UNIVERSOS PARALELOS Y GRAVEDAD CUANTICA

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Chorros y discos circumestelares

La espada del Cid



MALARIA... HANTAVIRUS... DENGUE... COLERA...

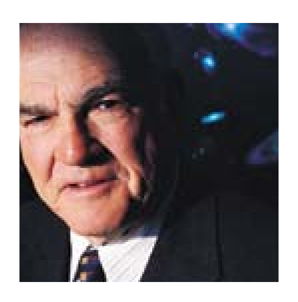
Los riesgos anunciados del calentamiento global



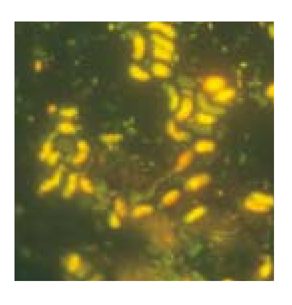
INVESTIGACION y CIENCIA

Octubre de 2000 Número 289

SECCIONES



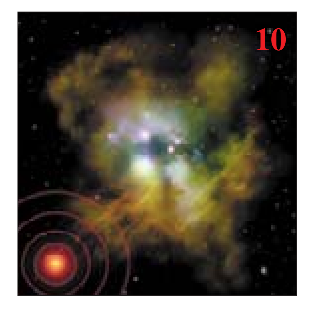


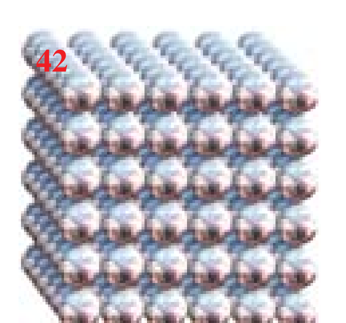






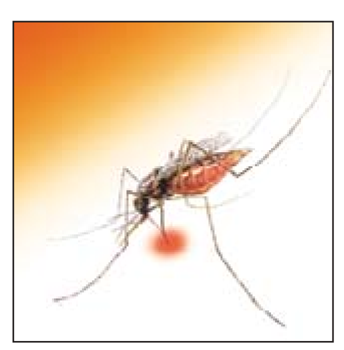






Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Roberto Osti

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Tom Draper Design
6	George Retseck
8	Cargill Dow
10-11	C. Robert O'Dell, Mark McCaughrean y John Bally, Telescopio Espacial *Hubble* y NASA (*izquierda*); Gary Bernstein, Megan C. Novicki y Lucent Technologies (*derecha*)
12-13	Alfred T. Kamajian (*arriba*); Christopher J. Burrows (*abajo*)
14	William B. Sparks; Thomas P. Ray; Michel Fich y Gerald Moriarty-Schieven; Jon A. Morse
15	Alfred T. Kamajian
16-17	Jean-Marc Bouju (*arriba y abajo izquierda*); Karel Prinsloo (*derecha*)
18	Bryan Christie, fuente: Pim Martens
19	Bryan Christie
20-21	Bryan Christie, fuentes: Centro de Predicción Climática NOAA; http://chge2.med.harvard.edu/enso/ disease.html
22	Bryan Christie
23	NASA (http://pao.gsfc.nasa.gov/gsfc/earth/rvalley/rvalley.htm)
42-43	Bryan Christie
44	Arvind Varma y Alexander S. Mukasyan
47-53	Bryan Christie
55-60	Antonio José Criado, Juan Antonio Martínez, José Manuel Jiménez y Rafael Calabrés
63	Giraudon/Art Resource
64-65	John W. Karapelou
66	Cortesía de Serge Stoleru (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
67	Laurie Grace
69	Heidi Noland
70	Patricia J. Wynne
71	Patricia J. Wynne, fuente: The Medieval Kitchen: recetas de Francia e Italia, Universidad de Chicago Press, 1998
72-73	Patricia J. Wynne
76-77	Ismael Baraibar Lopez (*fondo*); Javier Mantero Saenz (*en recuadro*); Federico Velázquez de Castro, Federico López Mateos y Emiliano Hernández Martín (*gráfica*)
78-81	Federico Velázquez de Castro, Federico López Mateos y Emiliano Hernández Martín
82-83	Daniels & Daniels
84-85	George Retseck
86	Patricia J. Wynne
88-89	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *Los primeros días de la vida de una estrella*; Manuel Puigcerver: *Salud y calentamiento global de atmósfera y océanos*; Juan Pedro Adrados: *Síntesis por combustión*; Juan Pedro Campos: *Nuevas dimensiones para otros universos*; Juan Carlos Rodríguez Rubio: *Circuitos nerviosos de la sexualidad masculina*; José Manuel García de la Mora: *Origen de la dieta moderna*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

MICROCIRUGÍA. «Para trabajar en el liliputiense mundo de las células se necesitan herramientas liliputienses. En los últimos años se han desarrollado instrumentos de alta precisión, que han convertido a la microcirugía celular en una parte importante del estudio del protoplasma. Con un micromanipulador podemos cortar una célula en minúsculos fragmentos, extraer el núcleo e incluso sus cromosomas, así como inyectar fluidos en núcleo y citoplasma.»

PREJUICIOS. «De las numerosas zonas de tensión en el seno de nuestra sociedad nosotros investigamos la hostilidad étnica, educado eufemismo para designar los prejuicios raciales. Nuestros resultados respaldan la hipótesis de que los estereotipos individuales no son sólo mecanismos de defensa vitalmente necesarios, sino que persisten, incluso bajo los efectos de experiencias tan reales e inmediatas como servir en una guerra al lado de judíos y negros. Una vez formado un estereotipo, no se erradica con facilidad. Podemos admitir que en tanto la ansiedad y la inseguridad persistan como raíces de la intolerancia, los esfuerzos para disipar los estereotipos o los sentimientos de hostilidad étnica mediante una campaña racional son como mucho paños calientes.» —Bruno Bettelheim y Morris Janowitz

...cien años

EL DESASTRE DE GALVESTON. «El informe especial de Isaac M. Cline, responsable local de los pronósticos del tiempo de la Oficina Meteorológica de Galveston, confirma en líneas generales los reportajes periodísticos del último y catastrófico huracán. Durante un corto rato después de las 18:15 horas se registró una velocidad máxima superior a los 150 km/h antes de que el viento arrancara el anemómetro. A las 19:30 horas, en la estación meteorológica se estimaba una altura de marea de unos 4,6 metros para elevarse, durante la hora siguiente, casi un metro y medio más. Según Cline ‘esas observaciones se tomaron cuidadosamente’. Hacia las 20:00 horas, una serie de casas que habían sido arrastradas por los elementos y se habían estrellado contra la estación meteorológica derribaron el edificio, y treinta y dos personas de las cincuenta que en él se habían refugiado fueron transportadas a la eternidad y con ellas el propio Cline. El informe afirma que ‘una estimación prudente sitúa las pérdidas de vidas en la horrible cifra de 6000’.»

LOS ALEUTIANOS DE ALASKA. «A los aleutianos de Alaska, expertos cazadores, el gobierno ruso solía suministrarles provisiones a cambio de pieles. La desaparición de los animales comestibles a causa de su matanza implacable ha hecho su existencia más difícil. En la construcción de sus lanchas nativas, o ‘bidarkas’, son muy ingeniosos y las manejan con sorprendente pericia. La bidarka consta de un armazón de madera cubierto con una piel de león marino. Al mejor remero se le concede el mando de la tripulación.»

PLAGAS ANIMALES. «En la División de Bioquímica de Agricultura se llevó a cabo, en 1892, el primer trabajo experimental de producción de un suero antitóxico para la fiebre y la peste porcinas. En cultivos de gérmenes de fiebre porcina se descubrió un fermento soluble, enzima del que se demostró su relación con la inmunidad. Durante los últimos tres años se ha preparado suero antitóxico experimental a gran escala, tanto para la fiebre como para la peste, con resultados muy satisfactorios.»

ELECTRICIDAD CONTRA FUEGO. «Los bomberos de París disponen de un artefacto perfeccionado, recientemente introducido al objeto de permitir llegar a los incendios y extinguirlos con mayor rapidez que hasta ahora. Nuestra ilustración muestra una bomba de incendios eléctrica preparada. El mismo motor eléctrico que impulsa al carro acciona la bomba en cuanto el vehículo se estaciona ante un incendio.»

Bomba de incendios eléctrica. París, 1900

...ciento cincuenta años

PAISAJE LUNAR. «El rasgo más notable de la superficie lunar es el número inmenso de anillos, o cráteres, que tachonan su superficie, sobreponiéndose, interceptándose y, diríase, empujándose unos a otros. Parece bastante seguro que tales anillos son el resultado de una intensa actividad volcánica en un período remoto. En seis octavos de las montañas volcánicas lunares había un cono en el centro del anillo. Esto mismo se observa en las montañas volcánicas extintas de la Tierra, siendo ese cono el fruto de los últimos estertores del volcán al expirar. La Luna posee una masa relativa a su superficie superior a la de la Tierra; bastó ese dato para explicar el mayor número de descargas volcánicas que cubren su piel.»

POLIS. «La ciudad de Pittsburgh tiene ahora dos cuerpos de vigilantes nocturnos, uno designado por el alcalde y el otro, por el Comité Policial. Sus funciones se han limitado a estorbarse mutuamente.»


Plásticos
de origen vegetal

Desde un punto de vista técnico, nada impide sustituir combustibles fósiles no renovables por plantas en la fabricación de plásticos. Pero, ¿es ésa la ansiada solución de la degradación del entorno?

Tillman U. Gerngross y Steven C. Slater

Conduciendo por una polvorienta pista del centro de Iowa, contempla el agricultor interminables hileras de maizales, mecidos por el viento, hasta los confines del horizonte. Sonríe para sus adentros recordando algo que muy pocos saben: no sólo cosechará los granos de las mazorcas, sino también gránulos de plástico que brotarán de los tallos y las hojas.

Esta imagen idílica de cultivar plásticos, dentro de un futuro previsible, encierra un atractivo inmensamente mayor que la manufactura de plásticos en factorías petroquímicas, que anualmente consume unos 270 millones de toneladas de petróleo en crudo y gas, en todo el mundo. Los combustibles fósiles son, a la vez, fuente de energía y materia prima de donde se obtienen los plásticos comunes, como el poliestireno, el polietileno y el polipropileno. Sería muy difícil concebir nuestra vida sin una serie de artículos que van desde envases y botellas hasta ropas de vestir y piezas de automóvil; sin embargo, crecen las dudas de que la producción de los plásticos pueda mantenerse indefinidamente. Se sabe que las reservas mundiales de crudo van a agotarse en unos 80 años, las de gas natural en 70 años y las de carbón en 700 años, pero la repercusión de su escasez en la economía podría sentirse mucho antes. Al disminuir los recursos subirán los precios, realidad que no pasa inadvertida a los políticos. El presidente Clinton promulgó un decreto en agosto de 1999 en el que instaba a los investigadores a procurar la sustitución de los recursos fósiles por vegetales, que sirvan, a un tiempo, de combustible y de materia prima.

Movidos por esta preocupación, los autores y otros ingenieros bioquímicos se entusiasmaron tras el descubrimiento de métodos para el desarrollo de plásticos en las plantas. A primera vista, semejante hito técnico debería resolver de una vez el problema inherente a la producción de los plásticos. Los sintetizados en plantas serían doblemente "verdes": se obtendrían a partir de un recurso renovable y podrían biodegradarse, llegado su momento. Otros tipos de plásticos, también procedentes de plantas, ofrecen un atractivo similar.

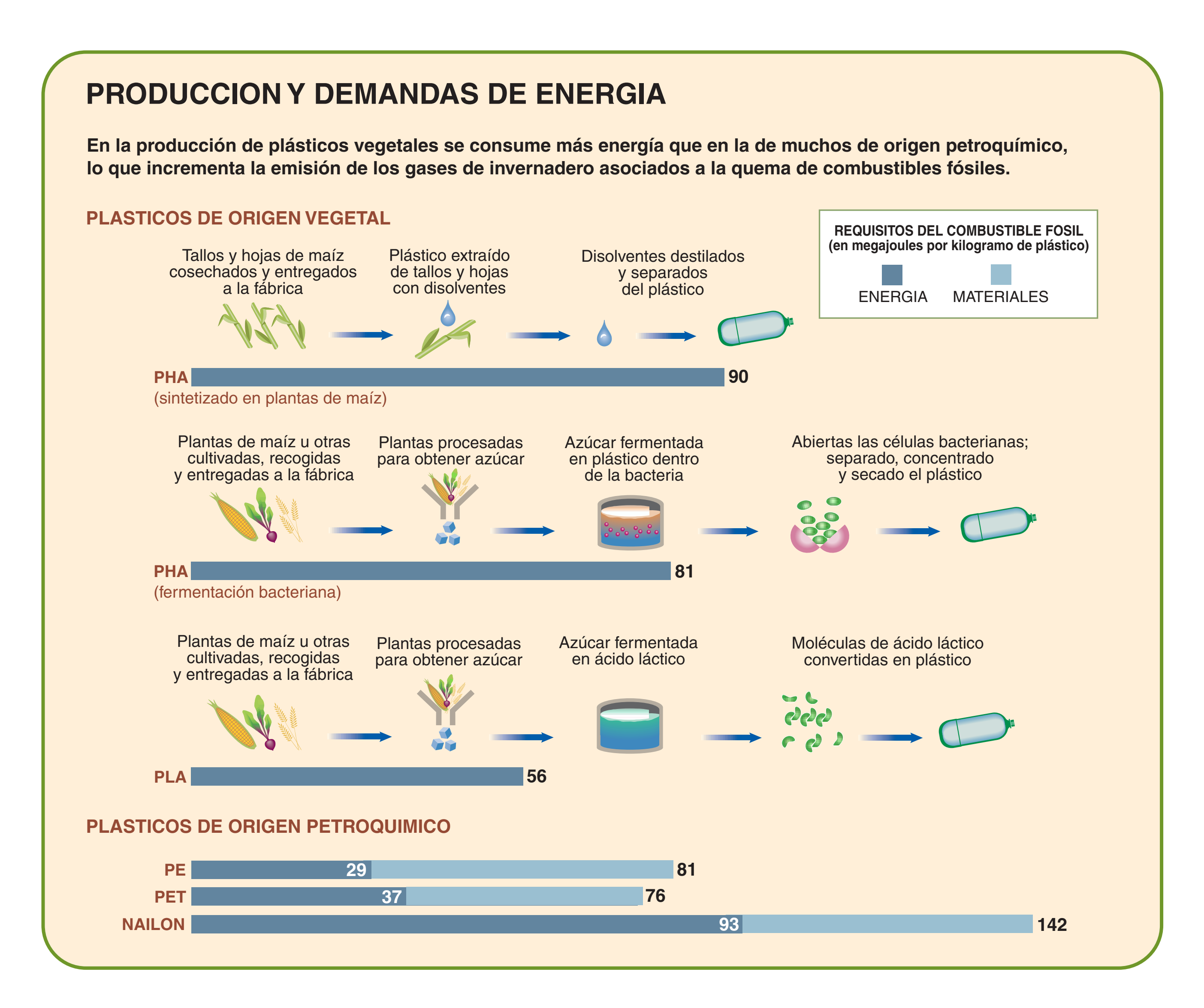
LA CRIA DE PLASTICO en las plantas se propuso como innovación capaz de reducir la demanda mundial de combustibles fósiles.

Pero las investigaciones recientes aguan el vino de la euforia. Cuestionan la conveniencia de tales estrategias. Por un lado, la biodegradabilidad tiene un precio oculto: la descomposición biológica del plástico desprende metano y dióxido de carbono (CO_2), gases de efecto invernadero ambos que retienen el calor y en cuya reducción hay un compromiso internacional. Por si fuera poco, todavía se necesitarían combustibles fósiles para extraer el plástico de las plantas, con un gasto de energía que sería muy superior a lo que todos habíamos imaginado. El éxito de la elaboración de plásticos "verdes" dependerá de que la investigación pueda superar estos obstáculos vinculados al consumo de energía, sin crear nuevas amenazas para el entorno.

La fabricación tradicional de plásticos gasta combustible fósil en cantidades altísimas. Los automóviles, camiones, aviones a reacción y centrales de energía se llevan más del 90 por ciento de la producción de las refinerías de petróleo, pero los plásticos consumen el grueso restante, en torno a los 80 millones de toneladas al año sólo en los EE.UU. Hasta la fecha, la biotecnología y las industrias agrarias se han esforzado en sustituir los plásticos tradicionales por otros de origen vegetal siguiendo tres líneas principales: conversión de los azúcares vegetales en plástico, producción de plástico en el interior de microorganismos y cultivo del plástico en el maíz y otras cosechas.

La agraria Cargill y la química Dow Chemical se propusieron, hace tres años, trabajar juntas en el desarrollo de la primera senda citada, convirtiendo el azúcar del maíz y otras plantas en polilactida (PLA), un plástico. Los microorganismos transforman el azúcar en ácido láctico; en un paso siguiente, las moléculas de ácido láctico constituyen cadenas de un plástico de propiedades semejantes al tereftalato de polietileno (PET), de origen petroquímico y utilizado en botellas de refrescos y fibras textiles.

La búsqueda de nuevos productos basados en azúcar de maíz era una ampliación natural de las actividades



de Cargill dentro de la industria de molturación húmeda del maíz, que convierte el grano en jarabe de maíz rico en fructosa, ácido cítrico, aceite vegetal, bioetanol y piensos para animales. En 1999 la empresa procesó casi 39 millones de toneladas de maíz, cerca del 15 por ciento de toda la cosecha del año en los Estados Unidos. Ya en el presente año, Cargill Dow ha invertido por valor de 54.000 millones de pesetas para iniciar a finales de 2001 la producción masiva de su nuevo plástico, llamado Nature-Works™ PLA.

Imperial Chemical Industries, por su lado, se especializó en la producción de un segundo plástico, el polihidroxialcanoato (PHA). A semejanza con el PLA, el PHA se obtiene de azúcar vegetal y es biodegradable. Sin embargo, en el caso del PHA la bacteria *Ralstonia eutropha* convierte directamente el azúcar en plástico. Para sintetizar el plástico, el PLA requiere una etapa química exterior al organismo, mientras que el PHA se acumula naturalmente dentro de las bacterias formando gránulos que pueden constituir hasta el 90 por ciento de la masa de una célula.

Ante las crisis del petróleo de los años setenta, Imperial Chemical estableció un proceso de fermentación a escala industrial en el cual los microorganismos convertían azúcares de plantas en varias toneladas de PHA por año. Otras compañías moldeaban el plástico para producir navajas, frascos de champú biodegradables y otros artículos comerciales, que se vendían en mercados especializados aunque a precios sensiblemente superiores a los fabricados con recursos de origen fósil. Su única ventaja funcional consistía en ser biodegradables. Monsanto adquirió en 1995 el proceso con las patentes asociadas, pero no logró hacerlo rentable.

Desde entonces numerosas agrupaciones empresariales y académicas, incluida la propia Monsanto, han canalizado sus esfuerzos para producir PHA por la tercera vía: sintetizar el plástico dentro de la planta misma. Si se modifica la constitución genética de un cultivar de suerte que pueda sintetizar una sustancia plástica a medida que crece la planta, se eliminaría el proceso de fermentación. En vez de sembrar, recoger la cosecha, extraer el azúcar de las plantas y fermentarla para transformarla en plástico, éste se produciría directamente en la planta. Tal enfoque aportaba, para muchos, la solución más eficaz —y la más elegante— fundada en un recurso renovable. En esa dirección han trabajado (y todavía siguen) numerosos laboratorios.

A mediados de los ochenta, uno de los autores (Slater) participó en un grupo que aisló los genes que confieren a las bacterias la capacidad sintetizadora de plástico. Se esperaba que la inserción de estas enzimas en una planta provocaría la transforma-

ción de la acetilcoenzima A —un compuesto que se forma naturalmente cuando la planta convierte la luz solar en energía— en un tipo de plástico. En 1992, un equipo de investigadores de la Universidad estatal de Michigan y de la James Madison lo consiguió. Por medios genéticos prepararon la planta *Arabidopsis thaliana* para que sintetizara un tipo de PHA quebradizo. Dos años después, Monsanto comenzó a producir un PHA más flexible dentro de una planta doméstica común: el maíz.

A fin de que la producción de plástico no tenga que competir con la de alimentos, la investigación se centró en la parte de la planta de maíz que no suele recogerse: el tallo y las hojas que encierran la panoja. Si se cría plástico en tallo y hojas, se podrá seguir recogiendo el grano de maíz con una cosechadora tradicional, y luego, en una segunda pasada, las hojas y tallos que contienen el plástico. A diferencia de la producción de PLA y PHA por fermentación, que en teoría compite en el uso del suelo con cultivos destinados a otros fines, la obtención de PHA en la propia planta permitiría cosechar granos de maíz y plástico de un mismo campo cultivado. (El empleo de gramíneas capaces de crecer en entornos marginales podría asimismo evitar que la producción de plásticos y otras necesidades se disputen el terreno.)

El problema: energía y emisiones

Se han logrado notables avances técnicos para aumentar la cantidad y las prestaciones del plástico vegetal. Considerados por separado, los resultados obtenidos son alentadores, pero resulta difícil lograr *a la vez* una composición que sea provechosa *y* un alto contenido de plástico en la planta. Hasta ahora, los cloroplastos de las hojas han demostrado ser el lugar óptimo de producción. Pero el cloroplasto es, también, el orgánulo celular que capta la luz; lo que significa que una elevada concentración de plástico podría inhibir la fotosíntesis y mermar la cosecha de grano de maíz.

Separar el plástico de la planta presenta, además, enormes dificultades. En Monsanto se consideró inicialmente que la extracción no era sino un proceso secundario dentro del tratamiento total a que se somete el maíz. Pero al diseñar una instalación teórica, se cayó en la cuenta de que la extracción y la recogida del plástico necesitaría grandes cantidades de disolvente, que habría de recuperarse tras su aplicación. El proceso exigiría una infraestructura de magnitud comparable a las actuales factorías petroquímicas de plástico y sobrepasaría las dimensiones de la planta de molturación de maíz original.

Con tiempo y recursos económicos suficientes podrían salvarse estos escollos técnicos. Nosotros teníamos previsto dedicar años de investigación al desarrollo de plásticos biodegradables, pero ahora nos preguntamos si merece la pena esforzarse por tales soluciones. El cálculo de la energía y materias primas consumidas en cada etapa de la obtención de PHA en plantas —cosechar y secar tallos y hojas, refinar el plástico, separar y reciclar el disolvente, y combinar plásticos para producir una resina— nos reveló que este tratamiento consumiría todavía más recursos fósiles que la mayoría de los procesos de fabricación petroquímicos.

En nuestro último estudio, terminado en la primavera pasada, nos decepcionó descubrir que producir un kilogramo de PHA a partir del maíz modificado genéticamente requeriría tres veces más energía que los 29 megajoules necesarios para fabricar una cantidad igual de polietileno (PE) mediante combustibles fósiles. Las ventajas de utilizar como materia prima maíz en vez de petróleo no podrían compensar semejante demanda de energía.

Con base en los actuales patrones de consumo de energía en la industria de tratamiento del maíz, se precisarían 2,65 kilogramos de combustible fósil para la producción de un solo kilogramo de PHA. A tenor de los datos recabados por la Asociación europea de fabricantes de plástico en 36 factorías, calculamos que un kilogramo de polietileno requería alrededor de 2,2 kilogramos de petróleo y gas natural, que casi en su mitad se incorporan al producto final. Dicho de otro modo: sólo se quema un 60 por ciento del total —o sea, 1,3 kilogramos— para generar energía.

La obtención de PHA en la propia planta permitiría cosechar granos de maíz y plástico de un mismo campo cultivado.



En estos términos de comparación, no es posible sostener que el plástico sintetizado en la planta de maíz y extraído con energía procedente de combustibles fósiles ayude a conservar este tipo de recursos. Lo que se gana al sustituir el recurso de vida finita por otro renovable se pierde con creces en el suplemento de energía que ello comporta. En un estudio anterior, uno de los autores (Gerngross) descubrió que la producción de un kilogramo de PHA por fermentación bacteriana exigía una cantidad similar —2,39 kilogramos— de combustible fósil. El desánimo consiguiente, entre otros factores, hizo que Monsanto, líder de las técnicas de producción de PHA vegetal, cancelara el año pasado el desarrollo de tales sistemas de producción de plástico.

El único plástico de origen vegetal que hoy se comercializa es el PLA de Cargill Dow. Abastecer de energía este proceso requiere del 20 al 50 por ciento menos recursos fósiles que la fabricación de plásticos a partir de petróleo, pero sigue exigiendo bastante más energía que la mayoría de los procesos petroquímicos. La compañía confía en que se recortará el consumo de energía. Todavía se han de aprovechar las mejoras conseguidas en la industria petroquímica tras varias décadas de trabajo. Una manera de disminuir el uso de combustible sería el desarrollo de otras fuentes de azúcar vegetal cuyo tratamiento consuma menos energía, por ejemplo, el trigo y la

TILLMAN U. GERNGROSS y STEVEN C. SLATER trabajan desde hace más de ocho años en el desarrollo de técnicas de fabricación de plásticos biodegradables. A ellos les debemos un mejor conocimiento de la enzimología y la genética de las bacterias productoras de plásticos. Gerngross enseña en el Colegio universitario de Darmouth y Slater es jefe de investigación en Cereon Genomics, filial de Monsanto.

EL PLASTICO VEGETAL, UNA REALIDAD

Patrick Gruber, vicepresidente de Cargill Dow, responde a preguntas sobre el nuevo plástico derivado de plantas que produce su compañía.

¿Cómo competirá el NatureWorks™ PLA con los plásticos petroquímicos?

El NatureWorks™ PLA combina una serie de propiedades en una sola familia de plásticos. Su textura satinada, capaz de conservar pliegues y torsiones mejor que los plásticos petroquímicos, atrae a las compañías que están desarrollando PLA para envolver caramelos u otros productos de consumo. El PLA ofrece también a los fabricantes de tejidos una fibra natural que puede competir con las sintéticas, como el nailon, tanto en propiedades como en facilidad de procesamiento. En total, los medios industriales han cifrado en miles de millones de libras el mercado potencial del PLA en el sector del vestido, la higiene, fibras para alfombras y empaquetado.

¿Qué ventajas ofrece el PLA para el entorno?

Al utilizar como materia prima azúcar de plantas en vez de combustibles fósiles, la producción del PLA consume del 20 al 50 por ciento menos recursos fósiles que los plásticos tradicionales. El PLA se descompone en sus constituyentes químicos originales para su aprovechamiento ulterior; puede reciclarse. Uno de nuestros clientes ya tiene en proyecto utilizar PLA en losetas de moqueta reciclables. El PLA es además biodegradable, de modo muy semejante al papel, en plantas municipales de elaboración de abonos. Por todo esto, el PLA reducirá la dependencia de los combustibles fósiles que hoy padecemos, a la par que proporciona productos ajustados a los métodos actuales de tratamiento de residuos. Estos innegables beneficios para el entorno son un premio adicional; creemos que la gente comprará PLA sobre todo por su buen rendimiento y porque puede competir con las demás técnicas existentes.

¿Compensan estas ventajas el que la producción de PLA consuma más energía que la de algunos plásticos petroquímicos?

Conviene señalar que esta técnica de fabricación de PLA sólo cuenta 10 años de existencia, y todavía ha de aprovecharse de las mejoras incorporadas durante casi 100 años a la industria de fabricación de plásticos petroquímicos. Nuestra primera factoría, que ahora se construye en Nebraska, sólo utilizará todavía el 40 por ciento de la energía de combustible fósil necesaria para la producción del nailon tradicional. Cuando nuestros expertos optimicen la producción de PLA, reduciremos hasta un 50 por ciento el consumo de energía de nuestras factorías segunda y tercera, previstas ya para el 2004.

¿Piensan abordar lo que Gerngross y Slater denominan "inconvenientes ambientales" del PLA?

Sí. Además de desarrollar métodos de producción que requieren menos energía, también investigamos procedimientos más eficaces para generar energía, incluida la cogeneración y el uso de combustibles renovables como la materia vegetal o biomasa. También buscamos materias primas alternativas para el PLA. La utilización de azúcares fermentables obtenidos de tallos y hojas del maíz permitiría recoger una segunda cosecha. Asimismo puede obtenerse PLA a partir de trigo, remolacha y otras plantas mejor adaptadas a determinados climas.



LAS ENVOLTURAS de caramelos son sólo uno de los productos que se prevé fabricar a partir del nuevo plástico vegetal de Cargill Dow cuando éste llegue al mercado a finales del 2001.

remolacha. Entre tanto, según estiman los expertos de Cargill Dow, en la primera instalación productora de PLA que hoy se construye en Blair se consumirán 56 megajoules de energía por cada kilogramo de plástico: un 50 por ciento más de lo que necesita el PET, aunque 40 por ciento menos de lo que requiere el nailon, otro competidor petroquímico del PLA.

La energía necesaria para la producción de plásticos de origen vegetal crea una segunda preocupación ambiental, quizás aún mayor. El petróleo fósil es el recurso primario para la fabricación tradicional de plástico, pero la producción vegetal depende sobre todo del carbón y del gas natural, utilizados para abastecer de energía las industrias de recolección y tratamiento del maíz. Cualquiera de los métodos concebidos para el tratamiento de plantas implica, por tanto, sustituir un combustible más escaso (petróleo) por otro más abundante (carbón). Hay quien sostiene que este cambio contribuye a mantener la producción viable. Pero semejante razonamiento adolece de un fallo: los combustibles fósiles utilizados para elaborar plásticos a partir de materias primas renovables (maíz) han de quemarse en su totalidad para generar energía, mientras que en los procesos petroquímicos hay una proporción apreciable de los recursos fósiles consumidos que se incorpora en el producto final.

La quema de combustibles fósiles en mayor cantidad agrava un problema climático mundial al aumentar la emisión de CO_2. Naturalmente, también van a aumentar otras emisiones asociadas a la energía fósil, como el SO_2, gas que contribuye a la lluvia ácida y que, por tanto, se ha de mirar con prevención. Por si fuera poco, todo proceso fabril que incremente tales emisiones se opone frontalmente al Protocolo de Kyoto, iniciativa internacional auspiciada por las Naciones Unidas para mejorar la calidad de la atmósfera y combatir el calentamiento global reduciendo el contenido de CO_2 y otros gases.

Las conclusiones de nuestro análisis son inapelables. El beneficio para el ambiente que supone la producción vegetal de plástico queda anulado con el injustificable aumento en el consumo de energía y emisiones de gases. Parece que el PLA es el único plástico vegetal con probabilidades de ser competitivo en este aspecto. Aunque tal vez no sea una solución tan elegante como la de producir PHA en las mismas plantas, existen

importantes factores que contribuyen a la eficacia de este proceso: el bajo consumo de energía y el elevado rendimiento de la conversión (casi el 80 por ciento de cada kilogramo de azúcar de planta utilizado entra en el producto de plástico final). Sin embargo, pese a todas las ventajas del PLA sobre otros plásticos de origen vegetal, su producción inevitablemente desprenderá más gases de efecto invernadero que la mayoría de los petroquímicos comparables.

La respuesta: energía renovable

Por poco alentadores que fueran nuestros primeros estudios, no dimos por fracasadas sin remedio estas técnicas de procesamiento de plantas. Pensamos que la quema de materia vegetal, que es biomasa, podría compensar la energía adicional requerida. Las emisiones generadas parecen menos perjudiciales que el CO_2 liberado por la combustión del carbono fósil, millones de años sepultado bajo tierra. La combustión del carbono contenido en los tallos de maíz y otras plantas no debería aumentar el CO_2 existente en la atmósfera, ya que en la siguiente primavera brotarán nuevas plantas capaces, en teoría, de absorber una cantidad igual de gas. (Por la misma razón, los plásticos de origen vegetal no elevan los niveles de CO_2 pues se incineran tras su utilización.)

Junto con otros investigadores, sostuvimos que el uso de biomasa renovable como fuente de energía primaria desharía el vínculo entre la industria de tratamiento del maíz y los recursos fósiles, aunque para ello habría que allanar barreras de orden técnico y construir una infraestructura de generación de energía enteramente nueva. Nos preguntamos si esto llegará algún día a conseguirse. El caso es que la producción de energía en los estados más ricos en maíz presenta tendencias opuestas: en la mayoría de dichos estados un porcentaje abrumador de su energía eléctrica se obtiene del carbón —el 86 por ciento en Iowa, por ejemplo, y el 98 por ciento en Indiana—, muy superior al promedio nacional estadounidense, cercano al 56 por ciento en 1998.

Monsanto y Cargill Dow examinaron posibles maneras de extraer energía de la biomasa. El análisis teórico de Monsanto se basaba en quemar, una vez separado el plástico, tallo y hojas para producir electricidad y vapor. En estas condiciones, se obtenía de la biomasa electricidad más que suficiente para abastecer el proceso de extracción de PHA. Podría llevarse la energía sobrante de la instalación productora de PHA a una central eléctrica próxima para sustituir parte del combustible fósil quemado, lo cual reduciría las emisiones globales de gases de invernadero obteniendo a la vez un plástico valioso.

Importa destacar que la ventaja fundamental para el entorno estriba en utilizar las plantas como fuente de energía, antes que como materia prima. Consideradas por separado la producción de plástico y la generación de energía, el enfoque racional consistiría en utilizar energía renovable en vez de energía fósil para muchos procesos industriales, con independencia de la producción de plásticos. Dicho de otro modo, no hay por qué preocuparse por suministrar energía a un proceso inherentemente más consuntivo cuando tenemos la opción de fabricar plásticos tradicionales con mucha menos energía y, por tanto, con menos emisiones de gases de efecto invernadero. Es claro que se combatirían las emisiones nocivas y el empobrecimiento de los recursos fósiles si se siguieran fabricando plásticos derivados del petróleo y en cambio se utilizara como combustible la biomasa renovable.

Por desgracia, no hay una receta única para superar todas las limitaciones ambientales, técnicas y económicas de los diversos sistemas de fabricación. Los plásticos tradicionales requieren combustibles fósiles como materia prima, mas no así el PLA y el PHA. Los plásticos habituales exhiben una gama más amplia de propiedades que los PLA y PHA, pero no son biodegradables. La biodegradabilidad ayuda a deshacerse de los residuos sólidos, pero a su vez provoca la liberación de gases de efecto invernadero. Es más sencilla la técnica de producir PLA y PHA por fermentación que la de sintetizar PHA en la propia planta de maíz, pero ha de competir con otras necesidades de la explotación agrícola. Y si bien la producción de PLA consume menos recursos fósiles que las de plásticos petroquímicos comparables, lo cierto es que en su fabricación se gasta más energía y, por tanto, hay mayor emisión de gases de efecto invernadero.

Las soluciones que adoptemos dependerán en último término de las prioridades asignadas al empobrecimiento de recursos fósiles, la emisión de gases de invernadero, el aprovechamiento del suelo, la eliminación de residuos sólidos y el beneficio económico, factores sujetos todos ellos a su propia interpretación, estructuras políticas y sistemas de valores. Sea cual fuere el proceso de fabricación del plástico, el consumo de energía y las emisiones constituyen la repercusión más notable en el entorno.

A la vista de ello, sugerimos que todo sistema de producción de plástico no se limite a reducir la emisión de gases de efecto invernadero, sino que avance un paso más, hasta invertir el ciclo del carbono en la atmósfera. Para conseguirlo habrá que encontrar la manera de producir plástico *no* degradable a partir de recursos que absorban CO_2 de la atmósfera, como son las plantas. Este plástico podría enterrarse luego, una vez utilizado, con lo cual absorbería el carbono del suelo, en lugar de devolverlo a la atmósfera. Ciertos plásticos biodegradables también pueden al fin absorber carbono, ya que los vertederos donde acaban muchos productos de plástico no suelen tener condiciones adecuadas para iniciar una rápida degradación.

En conclusión, tal vez sea demasiado pedir que la industria del plástico reduzca los niveles atmosféricos de CO_2. Pero cualquier proceso de fabricación, ya no sólo los de plásticos, encontraría ventajoso el empleo de materias primas renovables *y* energía renovable. Bien podría merecer la pena acometer los notables cambios en la infraestructura de la energía eléctrica mundial que esto conlleva. Después de todo, la energía renovable es el ingrediente esencial de todo plan detallado que establezca una economía viable, y como tal sigue siendo la primera barrera a superar para producir un plástico auténticamente "verde".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POLYHIDROXYBUTYRATE, A BIODEGRADABLE THERMOPLASTIC, PRODUCED IN TRANSGENIC PLANTS. Y. Poirier, D. E. Dennis, K. Klomparins y C. Somerville en *Science*, vol. 256, págs. 520-622, abril de 1992.

CAN BIOTECHNOLOGY MOVE US TOWARD A SUSTAINABLE SOCIETY? Tillman U. Gerngross en *Nature Biotechnology*, vol. 17, págs. 541-544; junio de 1999.



Los primeros días de la vida de una estrella

No hay formación de estrellas sin la contracción de gas y polvo. ¿Por qué se observan, pues, corrientes de materia que fluyen hacia el exterior?

Thomas P. Ray

Cualquier noche de invierno en el hemisferio norte, a eso de las 24 horas, observando el firmamento. ¿Qué vemos al sur? La constelación de Orión el Cazador, probablemente el grupo de estrellas mejor conocido después de la Osa Mayor (El Carro). Debajo del cinturón de Orión, dibujado con nitidez por tres estrellas prominentes en línea, se distingue la Espada del Cazador, en cuyo centro apreciamos una mancha débil y borrosa. Se trata de la nebulosa de Orión, una incubadora estelar gigantesca donde se arraciman miles de nuevas estrellas.

Orión es ideal para el estudio del nacimiento de estrellas. Se halla cerca —a 1500 años-luz de distancia— y aloja una excelente mezcla de estrellas de gran masa y otras de masa pequeña. Contiene también una gran cantidad de gas y polvo en forma de nube molecular. Ese tipo de nubes facilita la materia originaria de nuevas estrellas. Lo que acontece ahora en Orión debió de ocurrir en nuestra parte de la galaxia hace 5000 millones de años, cuando aparecieron el Sol y sus planetas.

El afán por desentrañar el mecanismo de formación de estrellas y planetas, asunto central en astronomía, viene de lejos. Pese a ello persistió largo tiempo desconocido. Hace veinte años los astrónomos sabían más de los tres primeros minutos del universo que de los primeros 3000 millones de días de la vida de nuestro sistema solar. Pero el velo se ha ido corriendo a lo largo del postrer decenio. Resulta ser que las estrellas muy jóvenes se parecen, en miniatura, al corazón de un cuásar; expulsan poderosos chorros de material hacia el exterior con el barrido coadyuvante de los campos magnéticos. Estas fuentes estelares de juventud, cuya espectacularidad recogen las fotografías, permiten resolver las paradojas que durante mucho tiempo atenazaron a los astrónomos.

El viaje de las estrellas

La búsqueda de una explicación del mecanismo de formación estelar y planetaria tiene una historia venerable. Hace unos 200 años, Pierre Simon Laplace propuso que el sistema solar se creó a partir de una nube de gas en rotación. La gravedad, aducía, empujó la mayor parte del gas hacia el centro y se originó el Sol. Al mismo tiempo, y debido al movimiento giratorio, parte del material no pudo ser absorbido por el joven Sol y se asentó en un disco. Tales sedimentos terminaron por convertirse en los planetas. De acuerdo con las actuales simulaciones numéricas del proceso, en cuanto la nube en rotación comienza a desplomarse, se procede de inmediato a la formación de una o varias estrellas, de un disco protoplanetario y de una envoltura residual de gas (átomos y moléculas solitarios) y polvo (grumos de átomos y moléculas).

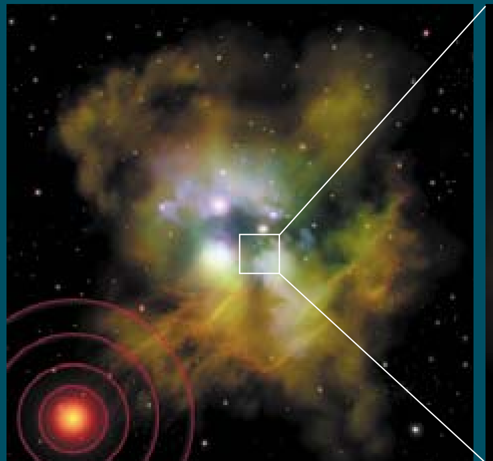
No todos aceptaron el modelo de Laplace. La teoría según la cual los planetas se crearon con material arrancado al Sol tras el paso de una estrella, una tesis rival, coexistió con la idea laplaciana hasta hace apenas unas décadas. La dificultad yacía en el campo de la observación: someter a contrastación el modelo trascendía las posibilidades de la astronomía hasta hace 30 años. Por una doble razón. En primer lugar, la nube residual de gas y polvo entorpece nuestra visión de la región a estudiar. En segundo lugar, los discos protoplanetarios subtienden en el firmamento ángulos muy pequeños: si tomamos la distancia entre el Sol y Plutón (seis mil millones de kilómetros) por referencia de la escala de los discos, los telescopios terrestres tradiciona-





1. ZONA DE FORMACION ESTELAR de la nebulosa de Orión (*página contigua*). La rodea una nube molecular inmensa, aunque invisible, que aloja un millón de soles en forma de gas y polvo en un volumen de 300 años-luz de diámetro. Las estrellas jóvenes de Orión están sumergidas en discos de material de un tamaño similar al de nuestro propio sistema solar (*arriba*); en torno a algunas de ellas podrían estar incluso formándose planetas.

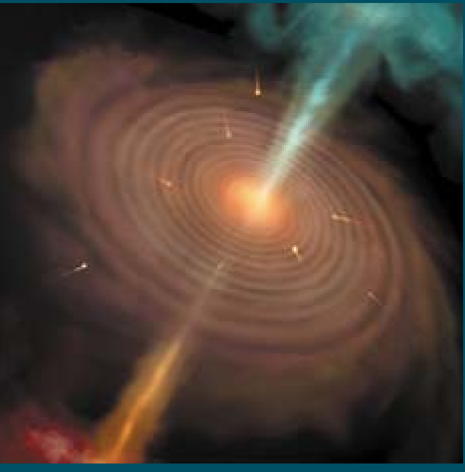
Del polvo a la estrella



Comienza la gestación de una estrella cuando interviene una perturbación externa, así una explosión de supernova en las cercanías, que produce la contracción de una nube de gas y polvo.



Se forman grumos de gas y polvo en el centro, rodeado por una envoltura de material y discos en rotación. Las fuerzas magnéticas dirigen chorros de materia a lo largo del eje.



La materia continúa cayendo al disco. Apenas una décima de ella torna de nuevo al exterior mediante corrientes, que desplazan el gas del entorno.

les podrían resolverlos hasta distancias de sólo 200 años-luz. De nada serviría, pues, construir telescopios mayores si la atmósfera cela los rasgos de interés.

Pero los astrónomos tenían, además, sus propios problemas en el campo de la teoría. Las estrellas de tipo solar, cuando jóvenes (100.000 años de edad), rotan una vez cada pocos días y cuadruplican o quintuplican el tamaño del Sol maduro. Conforme esas estrellas se van contrayendo, deberían girar más rápido, a imagen de los patinadores que cierran sus brazos. Resulta evidente, sin embargo, que el Sol se ha frenado; tarda ahora un mes en una rotación. Algo le ha restado momento angular. Pero, ¿qué?

Había que dilucidar, asimismo, en virtud de qué mecanismo las nubes moleculares sobreviven durante tanto tiempo. La gravedad las induce a la contracción o desplome; si no contaran con apoyo alguno, deberían implosionar en aproximadamente 1 millón de años. Pero se observan nubes que han perdurado decenas de millones de años. ¿De dónde reciben esa ayuda? No puede ser la presión térmica, pues las nubes están demasiado frías, justo a 10 o 20 kelvin. Las turbulencias podrían dar razón de su persistencia, mas ¿qué las originaría? En las nubes moleculares gigantes, pensemos en la de Orión, los vientos y las ondas de choque producidas por las estrellas masivas incitan al movimiento, pero muchas nubes pequeñas no contienen estrellas tan grandes.

THOMAS P. RAY enseña en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublín, tras haber trabajado en la Universidad de Sussex y en el Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg.

El primer obstáculo observacional surgió a finales de los años setenta. Los astrónomos habían comenzado a investigar las regiones de formación estelar a longitudes de onda que penetran en la envoltura de polvo. Aunque sus granos componentes absorben la luz en el visible, apenas intervienen a longitudes de onda mayores que su tamaño, de una micra de diámetro por lo común. Al estudiar la nube molecular de Orión y regiones similares en las longitudes de onda milimétricas —parte sin explorar hasta entonces del espectro electromagnético entre el infrarrojo y las ondas radio— los astrónomos identificaron grumos densos y fríos de 1 año-luz de diámetro aproximadamente. Tales núcleos moleculares, nombre técnico de los grumos, contenían unos pocos soles aún en forma de gas, por lo que se les asoció en seguida con las nubes en rotación de Laplace.

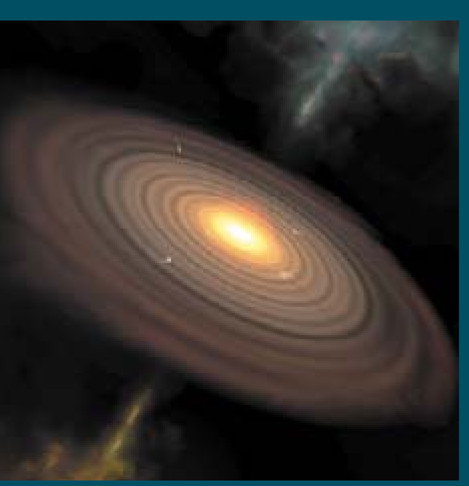
No tardaron en plantearse nuevos problemas. Aunque algunos núcleos parecían hallarse en proceso de contracción, la mayoría se muestran estabilizados mediante mecanismos que no se conocen todavía. Se ignora, asimismo, el agente desencadenante del desplome final, si bien podría tener relación con algún empuje exterior, una explosión de supernova cercana quizá. Pero el misterio más intrigante atañe a la dirección en la que el material se desplaza. En el marco de la hipótesis de Laplace, las estrellas surgen de la acreción gravitatoria; sería de esperar, por ende, la observación de signos de gas que fluyera hacia el interior de los núcleos.

Para su sorpresa, los astrónomos descubrieron que el gas en forma de moléculas (en oposición a los átomos y iones) procedía hacia fuera. Acostumbra haber dos lóbulos gigantes de gas molecular a ambos lados de una estrella joven. Estos lóbulos, de unos pocos años-luz de longitud, que tienen masas similares o incluso mayores que la de la propia estrella, se desplazan a velocidades de decenas de kilómetros por segundo.

Expulsando desde la cuna

Los lóbulos moleculares presentan una extraña similitud con los lóbulos, inmensamente mayores, de plasma caliente observados cerca de galaxias activas como los cuásares. Sabíase desde mucho antes que los chorros de materia producían tales lóbulos. Expulsadas hacia el exterior a velocidades próximas a la de la luz, las corrientes de materia pueden extenderse a lo largo de millones de años-luz desde las galaxias activas. ¿Cabría la posibilidad de que una versión en miniatura de estas corrientes se diera en los lóbulos moleculares de las regiones de formación de estrellas?

Esta idea remitía a un descubrimiento realizado por George H. Herbig y Guillermo Haro a principios de los años cincuenta. Herbig trabajaba por entonces en el observatorio Lick, en el norte de California, y Haro, en el observatorio mexicano de Tonantzintla. Cada uno por su cuenta observó ciertas manchas curiosas en Orión. Los hoy llamados objetos Herbig-Haro eran unas nubes pequeñas donde, se pensó, se gestarían las estrellas. (Algunos libros de divulgación astronómica siguen todavía re-



En el disco, el material se aglomera en planetesimales. La envoltura y los chorros de materia se disipan. En este momento ha transcurrido ya un millón de años.

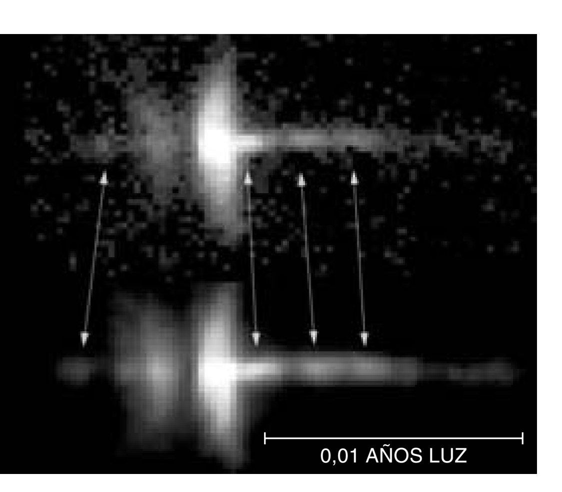


Las altas presiones y temperaturas que se registran en el centro de la estrella desencadenan la fusión nuclear. Y los planetesimales se han conjuntado en planetas.

pitiendo ese error.) Pero en 1975 Richard D. Schwartz se percató de que el espectro de un objeto Herbig-Haro manifestaba un estrecho parecido con el espectro del material residual de una explosión de supernova. Del corrimiento Doppler de las líneas espectrales infirió que los objetos Herbig-Haro se movían a velocidades de cientos de kilómetros por segundo.

Pese a que esa celeridad es menor que el movimiento de los restos de supernova, Schwartz supuso que los principios coincidían: los objetos Herbig-Haro consisten en gas calentado que se está expulsando desde la estrella. El calentamiento, al igual que en los restos de supernova, tiene su origen en el movimiento del propio gas; las ondas de choque convierten parte de la energía cinética en energía térmica y, posteriormente, en radiación. La hipótesis de Schwartz se vio respaldada cuando los astrónomos observaron fotografías de objetos Herbig-Haro obtenidas con diferencias de años. Era obvio que los objetos se movían. Extrapolando hacia atrás en el tiempo, los astrónomos dedujeron que la fuente del objeto Herbig-Haro era una estrella joven de escasos cientos de miles de años.

Se comprobó dicha conexión merced al advenimiento de una nueva revolución técnica: los detectores de carga acoplada (CCD) sensibles a la luz. Comparados con las placas fotográficas tradicionales, los CCD ofrecen mayor sensibilidad y contraste. En 1983 Reinhard Mundt y Josef Fried realizaron las primeras observaciones con CCD de esas corrientes estelares. El trabajo posterior de Mundt, Bo Reipurth, del Observatorio Europeo del Sur en Santiago de Chile, y otros (incluido el autor) mostró que los chorros de materia de las estrellas jóvenes se extendían a lo largo de varios años-luz. Guardaban una estrecha relación con los objetos Herbig-Haro. La verdad es que algunos objetos constituyen las partes más brillantes de los chorros. Se han descubierto otros con una forma curva causada por las propias corrientes de materia en su recorrido por el espacio gaseoso circundante a velocidades supersónicas; igual que una onda de choque que rodea a una bala en su trayectoria por el aire. Estos chorros presentan temperaturas típicas de 10.000 kelvin y contienen 100 átomos por centímetro cúbico: aunque de densidad mayor que el medio que las rodea, son más tenues en un factor 10.000 que el mejor vacío que se puede conseguir en la Tierra. Cerca de la estrella los chorros son angostos, abriéndose con un ángulo de unos pocos grados, pero lejos de la estrella se expanden hasta alcanzar diámetros mayores que la órbita de Plutón.



2. ESTAS FOTOGRAFIAS de una estrella recién nacida, Herbig-Haro 30, espaciadas un año en el tiempo, muestran bolsas de gas que fluyen desde el centro. Los chorros corren perpendiculares al disco oscuro que esconde a la estrella.

Fuera del camino

¿Qué relación guardan los chorros de materia y los objetos Herbig-Haro —constituidos ambos sobre todo de átomos y iones— con las corrientes moleculares? Cuando se descubrieron las corrientes moleculares se las suponía compuestas de gas acelerado por su vecindad a la estrella joven. Pero semejante deducción no está exenta de dificultades. Las corrientes moleculares, incluidas las asociadas a estrellas de masa pequeña, contienen a menudo varias veces la masa solar en gas. Si esta cantidad de materia tuviera que succionarse gravitatoriamente antes de acelerarse de nuevo, el proceso de formación de estrellas pecaría de suma ineficacia. Más convincente resultaba la explicación según la cual los lóbulos moleculares constarían de gas que se encuentra en el camino de la eyección de materia y es acelerado.

Ninguna de estas observaciones había llegado al corazón del tema que nos ocupa: el disco que ciñe a la estrella recién nacida. Desde hacía tiempo se venían recogiendo pruebas circunstanciales de la presencia de los discos. A principio de los años ochenta el satélite astronómico infrarrojo (*IRAS*) descubrió que muchas estrellas nuevas presentaban un exceso de radiación infrarroja, por encima de la que en teoría deberían emitir por sí mismas. Y se consideró que el polvo caliente del disco sería la fuente más probable de tal demasía. Por la misma época, los telescopios de ondas milimétricas comenzaron a tomar datos de la masa de gas y polvo en torno a las estrellas en cuestión. Hallaron masas de entre 0,01 y 0,1 veces la solar, vale decir, justo la cantidad de materia necesaria para formar sistemas planetarios. A mediados de los años ochenta, el grupo de Edward B. Churchwell acometió el estudio de la nebulosa de Orión en radio. Encontraron fuentes emisoras del tamaño de nuestro sistema solar y sugirieron que se trataba de nubes de gas caliente evaporadas de los discos.

Para vislumbrar los discos en sí mismos había que superar, sin embargo, el segundo obstáculo observa-

La acción de los chorros

Por misteriosos que resulten los mecanismos últimos que engendran los chorros de materia, esas corrientes se atienen siempre al mismo proceso básico: el equilibrio entre el poder de la gravitación y el momento angular. Aunque la gravedad insta a la materia hacia el centro de masas, sólo consigue, debido a las fuerzas centrífugas, reunir el material en un disco en rotación. Las estrechas corrientes de gas salen eyectadas a lo largo del eje de rotación, la dirección en la que la materia se mueve con mayor facilidad. La materia que se escapa lleva consigo parte del momento angular, dejando así que caiga menos material hacia el interior.



En el núcleo de la galaxia activa Messier 87, la fuerza que ocasiona este inmenso chorro es, eso se cree, un agujero negro cuya masa multiplica 1000 millones de veces la solar.



A una escala bastante menor, una estrella recién nacida expulsa materia y eyecta al exterior una corriente de gas, Herbig-Haro 34. El chorro de materia podría estar empujando el gas molecular de la zona hacia el exterior.



Al observar la región de formación estelar NGC 2264 en longitudes de onda milimétricas, los astrónomos han detectado dos lóbulos de gas molecular que se mueven a decenas de kilómetros por segundo. El color rojo indica las velocidades más rápidas, y el violeta las más lentas.



Las formaciones complejas de chorros de materia, evidentes en el objeto Herbig-Haro 47, se deben a variaciones en la continuidad de las eyecciones de materia y a los campos gravitatorios de estrellas compañeras.

cional: su tamaño, muy pequeño. Hubo que esperar a la alta definición facilitada por el telescopio espacial *Hubble* y por los instrumentos operantes en la superficie con técnicas de óptica adaptativa. En 1993 el grupo de C. Robert O'Dell apuntó hacia Orión el *Hubble* y observó, por fin, los discos que Laplace había predicho. Su material, golpeado sin cesar por la radiación intensa y los vientos de las estrellas masivas cercanas, parecía estar evaporándose. O'Dell bautizó a estos discos con el nombre de próplidos (en inglés "proplyds", contracción de la expresión "protoplanetary disks"). Denominación que podría inducir a error, puesto que los discos se evaporarán en unos millones de años, probablemente antes de que se formen planetas. Pero discos similares en medios más moderados deberían sobrevivir el tiempo suficiente para dar lugar al nacimiento planetario.

Obtenidos todos los componentes básicos de la versión moderna de la teoría de Laplace —nubes en rotación, chorros de materia y discos—, comenzó el estudio de las relaciones entre ellos. Mis colegas y yo mismo, junto con otro grupo liderado por Christopher J. Burrows, apuntamos el *Hubble* hacia el objeto Herbig-Haro 30, formado por dos chorros de materia en direcciones opuestas. Para nuestra sorpresa, las imágenes revelaron dos nebulosas en arco allí donde debería encontrarse la fuente de los chorros. Cortando por la mitad las nebulosas había una banda oscura. Se hizo pronto evidente que estábamos ante un disco perpendicular a los chorros. Desde nuestro ángulo de visión lateral, el disco obscurecía la estrella central. Las nebulosas son nubes de polvo iluminadas por luz estelar. La corriente de los chorros hacia el exterior constituye el toque final que compone los objetos Herbig-Haro. Las piezas del rompecabezas de la formación estelar comenzaban a encajar.

En las galaxias activas, los discos resultan determinantes en la formación de los chorros de materia. Pero, ¿cómo funciona el proceso en el embrión de una estrella? Una coincidencia curiosa ha proporcionado una pista clave. Todos los chorros de materia próximos a Herbig-Haro 30, con una excepción singular, tienen aproximadamente la misma orientación. Se alinean con el campo magnético de la nube madre. De ese modo parecían confirmarse ciertas ideas perspicaces, avanzadas por Ralph E. Pudritz, Colin A. Norman y Frank H. Shu, sobre mecanismos posibles en virtud de los cuales los campos magnéticos conducen una corriente de materia que procede de una estrella joven.

La astronomía cuenta con numerosos ejemplos de campos magnéticos que guían el gas ionizado. Las mismas auroras se deben a partículas cargadas que recorren las líneas del campo magnético terrestre y golpean la parte más exterior de la atmósfera. De manera similar, las partículas ionizadas de un disco circumestelar pueden sumarse a las líneas de campo o bien de la estrella o bien del disco. Puesto que el disco se halla girando, las partículas experimentarían una fuerza centrífuga y podrían ser arrojadas a lo largo de las líneas de campo. Al disco iría cayendo más materia para reemplazar la perdida, y así proseguiría el proceso. Aunque la mayor parte de la materia terminaría siendo captada por la estrella, la ex-

pulsada se cifraría en torno al 10 %. En las simulaciones por ordenador este proceso se muestra discontinuo, lo que explicaría las estructuras de nudos observadas en muchos chorros.

Se acabó la nebulosidad

Haber comprendido que los chorros de materia son parte constituyente de la formación estelar podría resolver varias cuestiones pendientes. En su viaje hacia el exterior las partículas transportan momento angular fuera de la fuente, lo que en parte explicaría por qué las estrellas maduras como el Sol rotan con parsimonia. Los chorros de materia podrían también agitar la nube circundante, proporcionando la turbulencia necesaria para frenar el desplome.

Muchos interrogantes, sin embargo, persisten abiertos. De entrada, sólo un 50 % de las estrellas jóvenes observables en el visible parecen presentar discos; el resto quizá los tuvo también y, verosímilmente, se conjuntaron en planetas. Pero no disponemos de pruebas observacionales que nos lo garanticen. Otro problema de la formación estelar atañe a la distribución de la masa de las estrellas. ¿Por qué es tan similar la razón entre estrellas de gran masa y estrellas de pequeña masa con independencia de su ubicación en la galaxia? Esta razón parece ser una propiedad fundamental de la peculiar fragmentación de las nubes moleculares, aunque los motivos de ello se ignoran. Sabemos muy poco de las primeras etapas de la vida de las estrellas de gran masa, en parte porque se trata de estrellas muy escasas y en parte porque evolucionan muy deprisa y no permiten una fácil observación durante su tiempo de gestación.

Con estas restricciones, los astrónomos pueden ahora esbozar el guión del alumbramiento estelar. Se forman en nubes interestelares que contienen los restos de generaciones anteriores de estrellas. El polvo se fabricó en los vientos fríos y en las atmósferas más exteriores de las estrellas a medida que éstas iban acercándose al final de su vida. En la composición química de las nubes también existen elementos pesados como el hierro y el oxígeno, forjados en los hornos nucleares de estrellas ya desaparecidas. Los campos magnéticos o las turbulencias agitan las nubes, aunque con el tiempo se desploman por su propio peso, quizá debido a que los campos magnéticos se debilitan, las turbulencias se disipan o se produce una explosión de supernova en las cercanías. Conforme cae el material, las nubes se fragmentan en trozos, cada una de los cuales dará lugar a un sistema de estrellas. En los núcleos moleculares de mayor masa, como los que originaron el cúmulo de la nebulosa de Orión, estos sistemas distan espaciados semanas-luz (no años-luz). La mayoría de las estrellas de la galaxia, incluido el Sol, nacieron probablemente en cúmulos de ésos.

Los chorros se llevan consigo parte del momento angular, lo que permite que continúe la captación de materia. Nuestro Sol alguna vez debió presentar esos chorros que se extendían a lo largo de varios años-luz. Qué provocó su desaparición, lo ignoramos. Es posible que el almacenamiento de la materia incorporada terminara en un momento determinado. Parte de la misma pudo haberse expulsado al exterior; si tal aconteció, los chorros desempeñaron un papel fundamental en la masa final del Sol. Simultáneamente, comenzaron a agruparse grandes granos de polvo para formar los planetesimales, los bloques de construcción de los planetas. Los planetesimales barrieron todo resto de gas, con la obstrucción consiguiente de los chorros. Las corrientes de materia procedentes del Sol y de sus contemporáneos estelares expelieron el gas y el polvo residuales que rellenaban el espacio entre ellos. Así se relajaron los lazos gravitatorios que ligaban a las estrellas; transcurridos unos pocos millones de años, las estrellas se dispersaron.

Dos siglos después de la hipótesis de la nebulosa de Laplace, las piezas del rompecabezas comienzan a ocupar su sitio. Del estudio de las estrellas jóvenes se desprende que no sólo continúa la formación planetaria, sino que, además, los planetas son objetos comunes en las galaxias.

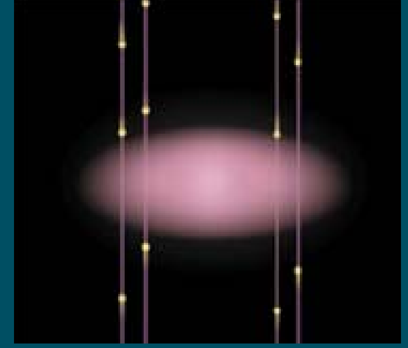
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORIGIN OF STARS AND PLANETARY SYSTEMS. Dirigido por Charles J. Lada y Nikolaos D. Kylafis. Kluwer Academic Publishers, 1999.

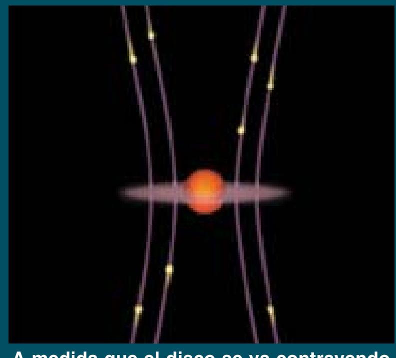
PROTOSTARS AND PLANETS IV. Dirigido por Vince Mannings, Alan P. Boss y Sara S. Russell. University of Arizona Press, 2000.

STAR FACTORIES: THE BIRTH OF STARS AND PLANETS. Ray Jayawardhana. Raintree/Steck Vaughn, 2000. (Recomendado para edades de 11 a 14 años.)

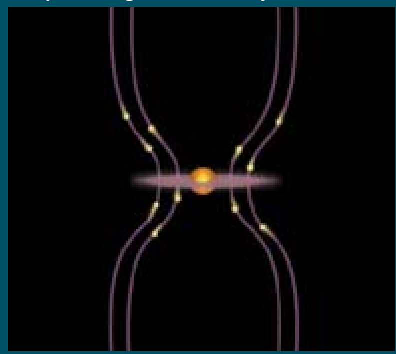
Magnético, itinerante



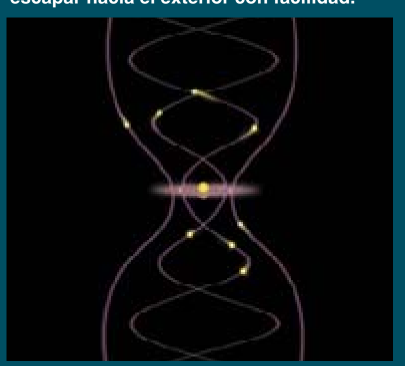
La creación de chorros de materia podría comenzar cuando el material —una mezcla de iones, átomos, moléculas y polvo— se precipita hacia el disco circumestelar a lo largo de las líneas del campo magnético.



A medida que el disco se va contrayendo bajo la acción de la gravedad, las líneas (congeladas en la materia) se atraen y adoptan la figura de un reloj de arena.



Cuando las líneas de campo se doblan hasta un ángulo de 30 grados con respecto a la perpendicular, las fuerzas centrífugas superan a la gravedad; la materia puede escapar hacia el exterior con facilidad.



La inercia del material en rotación dobla las líneas de campo y éstas forman una hélice, que permite encauzar el material centrifugado en una dirección vertical.

Salud y calentamiento global de atmósfera y océanos

Los modelos informáticos prevén la intensificación de muchas patologías con el calentamiento de la atmósfera terrestre. Ya han comenzado a aparecer las primeras confirmaciones de las dificultades pronosticadas

Paul R. Epstein

Si son pocos los científicos que pongan en cuestión que la atmósfera se está calentando, la mayoría coincide, además, en que lo hace a una velocidad acelerada y en que las consecuencias de ese cambio de temperatura podrían llegar a ser cada vez más insidiosas. Hasta los estudiantes de enseñanza media podrían recitarnos algunos de esos males anunciados: subida de la temperatura de los océanos, fusión de los glaciares con el ascenso consiguiente del nivel de los mares y anegamiento de zonas habitadas de costas bajas. Al propio tiempo, serán otras las regiones apropiadas para el cultivo. Las condiciones meteorológicas se volverán más inciertas y, más intensos, los temporales.

No acabarán ahí los daños, aunque el conocimiento de los mismos resulte menos común. Los modelos informáticos predicen que el calentamiento global y las alteraciones climáticas que induce, incrementarán la aparición y distribución de atentados graves contra la salud. Y lo que resulta especialmente preocupante: todo indica que esos presagios se están cumpliendo.

Por vías muy dispares incide el calentamiento atmosférico en la salud. La más directa es por su capacidad generadora de olas de calor, de mayor frecuencia e intensidad; adquieren particular gravedad si el atardecer deja de aportar alivio refrescante. Por desgracia, la pérdida de enfriamiento nocturno tiene todos los números; la atmósfera, que se está calentando de manera desigual, registra los mayores ascensos por la noche, en invierno y a latitudes superiores a los 50 grados. Se prevé que en ciertos lugares el número de muertes asociadas a las olas de calor se duplique de aquí al año 2020. El calor prolongado favorece, además, la formación de nieblas ácidas y la dispersión de alérgenos. Ambos efectos se han relacionado con problemas respiratorios.

De un modo menos directo, el calentamiento global constituye también una amenaza seria contra la salud al alterar las condiciones meteorológicas habituales, en particular al aumentar la frecuencia e intensidad de inundaciones y sequías y provocar rápidos cambios de tiempo. Con el calentamiento de la atmósfera operado a lo largo de los últimos cien años, han persistido durante más tiempo las sequías en zonas áridas y se han multiplicado los episodios de precipitación intensa, con su rosario de muertos de hambre y ahogados. No sólo eso. Tales desastres favorecen la aparición, reintroducción y propagación de numerosas enfermedades infecciosas.

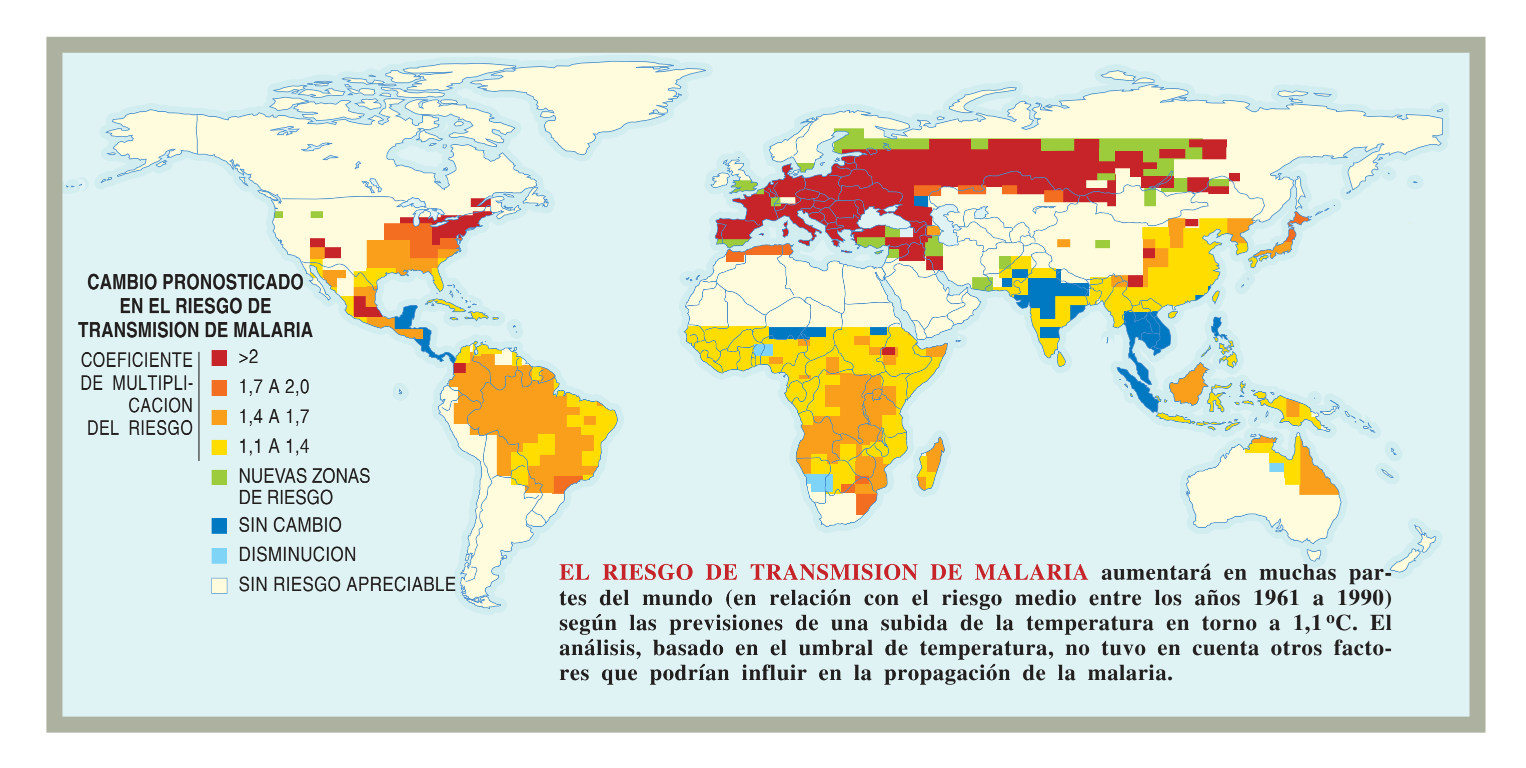
Se abre un panorama harto preocupante. Puede ser muy difícil encerrar de nuevo en su botella al geniecillo de la enfermedad infecciosa. Quizás en su primera embestida cause menos bajas que una inundación arrasadora o una sequía pertinaz, pero una vez enraizada en una comunidad, acostumbra desafiar su erradicación y puede invadir otras zonas.



1. LA MUJER MALGACHE de la derecha enjuaga arroz en agua tomada del portal inundado de su choza. Las grandes inundaciones desatadas a principio de este año en Madagascar y Mozambique trajeron epidemias de cólera (enfermedad transportada por las aguas) y malaria (transmitida por los mosquitos). En la foto inferior izquierda, una madre mozambiqueña sostiene a su hijo, atacado quizá por la malaria; a su derecha, el cuerpo de una víctima del cólera en Madagascar es introducido en un ataúd. Con el calentamiento global se prevé que menudeen inundaciones y sequías devastadoras por todo el mundo, con su secuela inevitable de enfermedades infecciosas.







EL RIESGO DE TRANSMISION DE MALARIA aumentará en muchas partes del mundo (en relación con el riesgo medio entre los años 1961 a 1990) según las previsiones de una subida de la temperatura en torno a 1,1 ºC. El análisis, basado en el umbral de temperatura, no tuvo en cuenta otros factores que podrían influir en la propagación de la malaria.

La cuestión del control reviste una importancia principal en los países en vías de desarrollo, donde escasean los recursos para el tratamiento y prevención. Pero tampoco las naciones industrializadas se hallan exentas de ataques súbitos, como ocurrió el año pasado cuando el virus del Nilo Occidental apareció en Norteamérica y mató a siete neoyorquinos. En nuestra época de internacionalización del comercio y los viajes, cualquier trastorno infeccioso que aparece en una parte del mundo puede rápidamente convertirse en un problema en otro continente si el patógeno, o agente responsable de la enfermedad, encuentra un entorno propicio.

Inundaciones y sequías asociadas al cambio climático global podrían, asimismo, socavar la salud por otros medios. Al dañar los cultivos y hacerlos vulnerables a la infección y a las plagas por insectos y malas hierbas, reducirían la disponibilidad de alimentos con su secuela de desnutrición. En los países subdesarrollados, el desplazamiento forzado, permanente o semipermanente, de poblaciones enteras en busca de alimento llevaría a fenómenos locales de superpoblación con problemas de tuberculosis y otras enfermedades relacionadas con el hacinamiento.

El tiempo se hace más extremado y variable con el calentamiento atmosférico. Se debe ello, en parte, a la aceleración, inducida por dicho calentamiento, del ciclo del agua: el proceso en virtud del cual el vapor de agua, principalmente de los océanos, pasa a la atmósfera antes de condensarse y caer en forma de precipitación. Una atmósfera más cálida calienta a su vez los océanos (promoviendo una evaporación más rápida) y puede contener más vapor de agua que si está fría. Cuando el agua extra se condensa, cae con más frecuencia en forma de chubascos intensos. En paralelo al calentamiento oceánico, ocurre lo propio en tierra firme, cuyos suelos se tornan de una aridez extrema en las regiones secas. Aridez que favorece los gradientes de presión promotores de desarrollo de los vientos, con su secuencia de vientos turbulentos, tornados y otros temporales violentos. Además, la modificación de los gradientes de presión y temperatura que acompaña al calentamiento global puede trastocar la distribución de lugares y momentos en que se producirán los temporales, inundaciones y sequías.

Antes de abordar con mayor detalle los preocupantes efectos sobre la salud del calentamiento global y de la alteración de las características climáticas, conviene anotar que no todas las consecuencias pudieran resultar dañinas. Las temperaturas muy altas en regiones cálidas podrían diezmar las poblaciones de caracoles, que intervienen en la transmisión de la esquistosomiasis, una enfermedad parasitaria. Los vientos fuertes dispersan la contaminación. Los vientos más cálidos que soplaran en regiones frías reducirían las cardiopatías y las enfermedades respiratorias asociadas al frío. Pero, en conjunto, es probable que los efectos indeseables de un tiempo más variable comporten nuevas tensiones y sorpresas enojosas que ensombrezcan los efectos beneficiosos.

El calor, aliado de los mosquitos

Las enfermedades transmitidas por mosquitos —malaria, dengue, fiebre amarilla y varias clases de encefalitis— se numeran entre las más insidiosas de cuantas van ligadas al calentamiento global. Los mosquitos ingieren los microorganismos patógenos al chupar la sangre de un ani-

PAUL R. EPSTEIN, especialista en salud pública tropical, es director adjunto del centro de salud y entorno adscrito a la Facultad de Medicina de Harvard. Ha ejercido la medicina, enseñado e investigado en Africa, Asia e Iberoamérica, amén de colaborar con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio.

mal o persona infectados. El patógeno se reproduce en el interior del insecto, y éste puede inocular dosis capaces de causar la enfermedad en su próxima víctima.

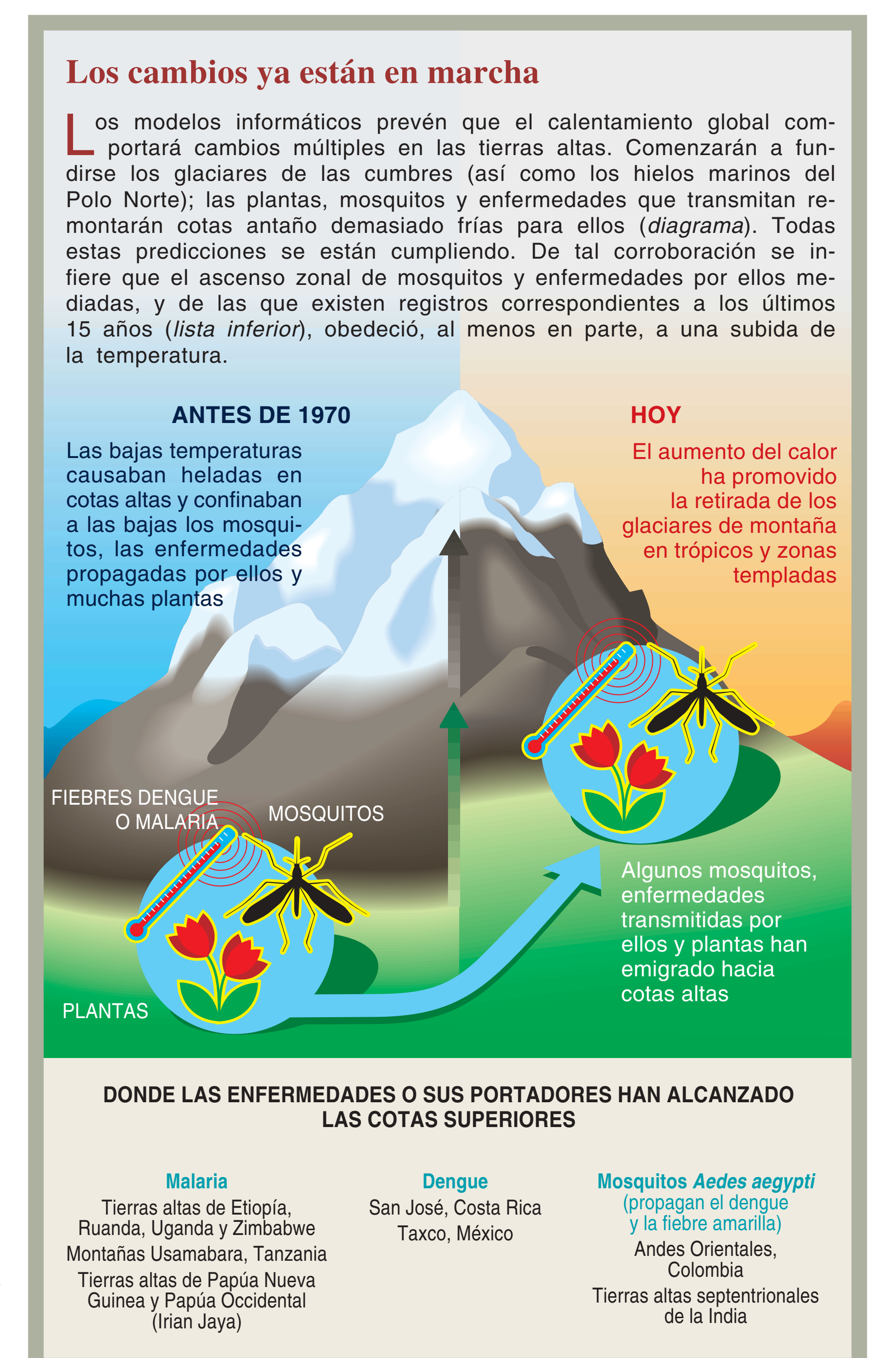
Las enfermedades causadas por mosquitos figuran entre las que adquirirán creciente prevalencia porque tales vectores son muy sensibles a las condiciones meteorológicas. El frío constituye un aliado de los humanos porque confina los mosquitos portadores a las estaciones y regiones en donde las temperaturas permanecen por encima de ciertos mínimos. Las heladas invernales matan muchos huevos, larvas y adultos. Los mosquitos *Anopheles*, que transmiten los parásitos del paludismo (tales como el *Plasmodium falciparum*), sólo causan brotes prolongados de malaria si las temperaturas exceden habitualmente los 15 grados Celsius. De manera similar el mosquito *Aedes aegypti*, responsable de la fiebre amarilla, transmite el virus muy raramente allí donde las temperaturas caen por debajo de los 10 grados Celsius.

El calor excesivo mata a los insectos con la misma contundencia que el frío. Ahora bien, dentro del intervalo de temperaturas de supervivencia, los mosquitos se multiplican mejor y agreden con mayor frecuencia cuanto más caliente está el aire. Al propio tiempo, con el incremento de calor se aviva la tasa reproductora y se adelanta la maduración de los patógenos hospedados en su interior. A 20 grados Celsius, el parásito *P. falciparum* tarda 26 días en desarrollarse plenamente, pero a 25 grados Celsius sólo 13 días. *Anopheles*, que transmite este parásito de la malaria, vive sólo unas semanas; las temperaturas más altas aumentan la probabilidad de que los parásitos maduren a tiempo para que los mosquitos propaguen la infección. Al abarcar el calentamiento zonas extensas, los mosquitos podrían colonizar territorios antaño prohibidos, portando allí la enfermedad. Sin olvidar que la subida de la temperatura nocturna e invernal podrían permitirles una mayor propagación de la patología durante períodos más largos en sus regiones de habitación tradicionales.

El calentamiento extra no es el único factor que favorece el aumento de enfermedades propagadas por mosquitos. La intensificación de las inundaciones y las sequías causadas por el calentamiento global pueden ambas ayudar a desencadenar epidemias creando condiciones de reproducción para insectos cuyos huevos desecados son todavía viables y eclosionan en aguas estancadas. Al retirarse las inundaciones, dejan tras de sí charcos. En épocas de sequía, los torrentes se pueden convertir en charcas estancadas y la gente puede echar a ellas pozales para sacar agua; estas charcas, y también los recipientes, pueden convertirse en incubadoras de nuevos mosquitos. Y los insectos pueden recibir un nuevo impulso si el cambio climático u otros procesos (modificación humana del entorno) reducen las poblaciones de depredadores que mantienen los mosquitos a raya.

Enfermedades transmitidas por mosquitos

De las enfermedades transmitidas por mosquitos, la malaria y el dengue serían las que, a buen seguro, conocerían un progreso espectacular con la subida general de la temperatura. La malaria (caracterizada por escalofríos, fiebre, dolores y ane-



Los cambios ya están en marcha

Los modelos informáticos prevén que el calentamiento global comportará cambios múltiples en las tierras altas. Comenzarán a fundirse los glaciares de las cumbres (así como los hielos marinos del Polo Norte); las plantas, mosquitos y enfermedades que transmitan remontarán cotas antaño demasiado frías para ellos (*diagrama*). Todas estas predicciones se están cumpliendo. De tal corroboración se infiere que el ascenso zonal de mosquitos y enfermedades por ellos mediadas, y de las que existen registros correspondientes a los últimos 15 años (*lista inferior*), obedeció, al menos en parte, a una subida de la temperatura.

DONDE LAS ENFERMEDADES O SUS PORTADORES HAN ALCANZADO LAS COTAS SUPERIORES

Malaria	Dengue	Mosquitos *Aedes aegypti* (propagan el dengue y la fiebre amarilla)
Tierras altas de Etiopía, Ruanda, Uganda y Zimbabwe	San José, Costa Rica	Andes Orientales, Colombia
Montañas Usamabara, Tanzania	Taxco, México	Tierras altas septentrionales de la India
Tierras altas de Papúa Nueva Guinea y Papúa Occidental (Irian Jaya)		

mia) causa ya 3000 bajas diarias, niños en su mayoría. A finales del siglo XXI, con el progresivo calentamiento, se habrá extendido la zona de transmisión potencial de la malaria desde un área que alberga el 45 por ciento de la población mundial hasta otra que abarcará alrededor del 60 por ciento, vaticinan algunos modelos. Un pronóstico nada halagüeño si recordamos que no existe vacuna fiable y que los parásitos responsables están adquiriendo resistencia contra los medicamentos acostumbrados.

En concordancia con los modelos, la malaria está reapareciendo al norte y sur de los trópicos. En los EE.UU. medraron largo tiempo los mosquitos *Anopheles*; la malaria se encontraba allí arraigada hace decenios. Merced a los programas de control de mosquitos y otras medidas de salud pública, en 1980 la enfermedad quedaba confinada a California. Sin embargo, desde 1990, en que se inició el decenio más cálido nunca registrado, se han venido produciendo brotes locales de malaria durante olas de calor en Texas, Florida, Georgia, Michigan, Nueva Jersey y Nueva York (así como en Toronto), episodios que comenzaron, sin duda, con un mosquito errante o perdido que portaba el parásito. Pero los microorganismos responsables hallaron condiciones idóneas en los EE.UU., a saber, suficiente calor y humedad y abundancia de mosquitos capaces de transmitirlos a sus víctimas. La malaria ha retornado a la península coreana, Europa meridional y la antigua Unión Soviética, así como la costa índica de Sudáfrica.

También se está expandiendo el dengue, grave infección vírica que se acompaña a veces de hemorragias internas fatales. Afecta a una población estimada en 50 o 100 millones en los trópicos y subtrópicos (principalmente en zonas urbanas y sus aledaños). A lo largo de los últimos diez años ha ensanchado ya su zona de invasión en América del Norte y del Sur. A finales de los noventa había llegado a Buenos Aires, y se le ha encontrado en el norte de Australia. No existe todavía vacuna ni tratamiento específico con medicinas apropiadas.

Aunque esta propagación de la malaria y el dengue corroboran las predicciones, no podemos adscribir con absoluta certeza la causa de esta expansión al calentamiento global. Podrían hallarse comprometidos otros factores; por ejemplo, una modificación del entorno que prime la proliferación de mosquitos, la menor atención al control de mosquitos y a otros programas de salud pública, así como el aumento de la resistencia contra medicamentos e insecticidas. La responsabilidad de la contribución climática crece, sin embargo, cuando aparecen otras consecuencias previstas del calentamiento global asociadas a brotes epidémicos.

Ocurre así por doquier en las tierras altas. De acuerdo con lo esperado para esas zonas, el calentamiento, lo mismo que plantas y mariposas, está escalando montañas con la fusión consiguiente de los glaciares de las cimas. Desde 1970, la altura de las temperaturas permanentes por debajo de cero grados Celsius ha ascendido casi 150 metros en los trópicos. En esa escalada se suman los mosquitos y las enfermedades que transmiten.

A lo largo del siglo XIX, los colonos europeos de Africa se establecieron en las zonas montañosas, más frescas, para escapar del peligroso aire de los pantanos (“mal aria”) que fomentaba la enfermedad en las tierras bajas. Muchos de esos refugios se hallan ahora en entredicho. Se están encontrando insectos e infecciones propagadas por ellos a grandes alturas, en América del Sur y Central, Asia y Africa Central y Oriental. Desde 1980, los mosquitos de la especie *Ae. aegypti*, antaño confinados a las cotas bajas por mor de la temperatura, han venido apareciendo por encima de 1600 metros en las tierras altas del norte de la India y por encima de 2000 metros en los Andes colombianos. Su presencia incrementa el riesgo de dengue y fiebre amarilla. Que se sepa, el dengue ha escalado ya los 1600 metros en Taxco, México. Puesto que el comportamiento migratorio de los insectos cambia más deprisa en las mon-

El mensaje de El Niño

La investigación de subsistemas suele aportar datos que nos permiten ahondar en el funcionamiento de sistemas complicados. Es el camino seguido en el estudio de los efectos producidos por el calentamiento global sobre la salud. En esa línea, se está sometiendo a criba la influencia de El Niño/Oscilación Meridional (ENSO), proceso climático que produce muchos cambios meteorológicos idénticos a los pronosticados para un mundo que se calienta. Lo recopilado no resulta tranquilizante.

“El Niño” designa un fenómeno oceánico que se materializa aproximadamente cada cinco años en el Pacífico tropical. Ante las costas de Perú el océano se calienta por encima de los niveles de normalidad y permanece así durante meses antes de retornar al estado habitual o pasar a un frío extremado (La Niña). Por “Oscilación Meridional” se entienden los cambios atmosféricos asociados a esos cambios antagónicos del Pacífico, fuera de la normalidad.

Durante un episodio de El Niño, la evaporación de un Pacífico oriental más caliente engendra lluvias copiosas en ciertas zonas de Sudamérica y Africa; mientras tanto, padecen sequías otras regiones de Sudamérica y Africa y partes del sudeste asiático y Australia. Los cambios de presión atmosférica sobre el Pacífico tropical producen también efectos de rizado en todo el globo, con inviernos benignos en algunas regiones septentrionales de los EE.UU. y Ca-



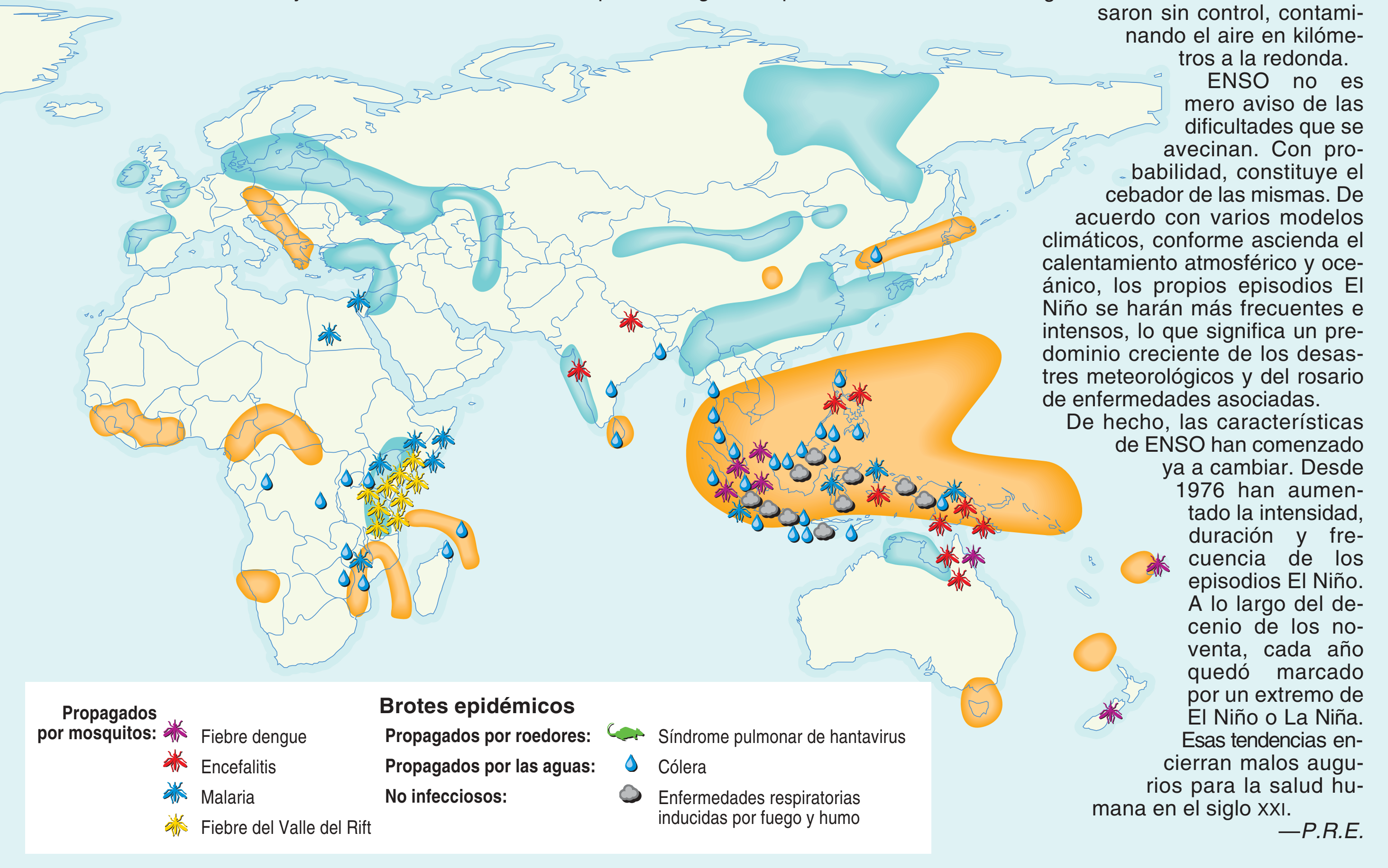
nadá occidental. Durante un episodio de La Niña, las características meteorológicas en las áreas afectadas pueden pasar a los extremos opuestos.

La incidencia de enfermedades mediadas por vectores y por las aguas asciende durante los años de El Niño y La Niña, sobre todo en las zonas afectadas por inundaciones y sequías. Los estudios a largo plazo realizados en Colombia, Venezuela, India y Pakistán revelan que la malaria aparece en la estela de los episodios El Niño. Y el autor y su grupo de la Universidad de Harvard han mostrado que las regiones que sufrieron inundaciones o sequías durante el fenómeno de El Niño correspondiente a 1997-98 (el más intenso del siglo) tuvieron que luchar, además, con una gavilla convergente de enfermedades transmitidas por mosquitos, roedores y aguas (*mapa*). Además, en muchas regiones secas los incendios arrasaron sin control, contaminando el aire en kilómetros a la redonda.

ENSO no es mero aviso de las dificultades que se avecinan. Con probabilidad, constituye el cebador de las mismas. De acuerdo con varios modelos climáticos, conforme ascienda el calentamiento atmosférico y oceánico, los propios episodios El Niño se harán más frecuentes e intensos, lo que significa un predominio creciente de los desastres meteorológicos y del rosario de enfermedades asociadas.

De hecho, las características de ENSO han comenzado ya a cambiar. Desde 1976 han aumentado la intensidad, duración y frecuencia de los episodios El Niño. A lo largo del decenio de los noventa, cada año quedó marcado por un extremo de El Niño o La Niña. Esas tendencias encierran malos augurios para la salud humana en el siglo XXI.

—*P.R.E.*



tañas que al nivel del mar, tales modificaciones en las pautas nos sirven de indicadores de alteraciones climáticas y de expansión de las enfermedades.

Los oportunistas buscan las condiciones extremas

La creciente variabilidad climática que acompaña al calentamiento revestirá quizás una importancia mayor que el propio calentamiento. Por la sencilla razón de que constituye el caldo de cultivo de los brotes de enfermedades mediadas por vectores. Los inviernos cálidos seguidos de veranos tórridos y secos (secuencia que podría convertirse en harto común al calentarse la atmósfera) favorecen la transmisión de la encefalitis de San Luis y otras patologías que describen ciclos donde intervienen aves, mosquitos urbanos y personas, en ese orden.

Tal secuencia parece haberse dado en la súbita aparición del virus del Nilo Occidental en Nueva York, hace un año. Aunque se ignora cómo entró el virus en los EE.UU., podemos ofrecer una explicación razonable de su persistencia y expansión si atendemos a los efectos del tiempo sobre los mosquitos de la especie *Culex pipiens*, responsables decisivos de su propagación. Esos inquilinos de las ciudades ponen sus huevos en sótanos húmedos, alcorques, cloacas y charcos de agua sucia.

Esta sería la interacción probable entre el tiempo, los mosquitos y el virus: el suave invierno de 1998-99 permitió a muchos mosquitos sobrevivir hasta una primavera precoz, cuya sequía y la del verano subsiguiente concentró los nutrientes orgánicos en sus zonas de reproducción y, a la vez, mató a los depredadores naturales de los mosquitos, a saber, libélulas y mariquitas, encargadas de mantener a raya la población de esos vectores. La sequía indujo también la agrupación de las aves, pues compartían menos charcos, y menores, a los que acudían asimismo los mosquitos.

Una vez ingerido el virus por los mosquitos, la ola de calor que acompañó a la sequía aceleró su maduración en el interior de los insectos. Conforme los mosquitos infectados buscaban luego alimentación sanguínea, difundían prestamente el virus entre los pájaros. A la infección galopante de las aves corría pareja la de los mosquitos, en número tal, que, desparramados, pudieron infectar a las personas. Las lluvias torrenciales de finales de agosto crearon nuevos charcos para la cría de *C. pipiens* y otros mosquitos, desencadenando una nueva hornada de portadores potenciales de virus.

Igual que los mosquitos, otros vectores portadores de enfermedades tienden a convertirse en “plagas”, vale decir, oportunistas que se reproducen muy deprisa y medran bajo condiciones perturbadas e inhóspitas para organismos más especializados. La variabilidad climática registrada en los años noventa contribuyó a la aparición del síndrome pulmonar hantavírico, infección de los pulmones altamente letal, transmitida por roedores. Salta de éstos al hombre cuando inhala partículas víricas escondidas en las secreciones y excreciones de los múridos. La secuencia de extremos meteorológicos que preparó el escenario para el primer brote, identificado en el sudoeste norteamericano en 1993, fueron unas sequías persistentes interrumpidas por intensas lluvias.

Un primer episodio de sequía regional mermó la población de de-

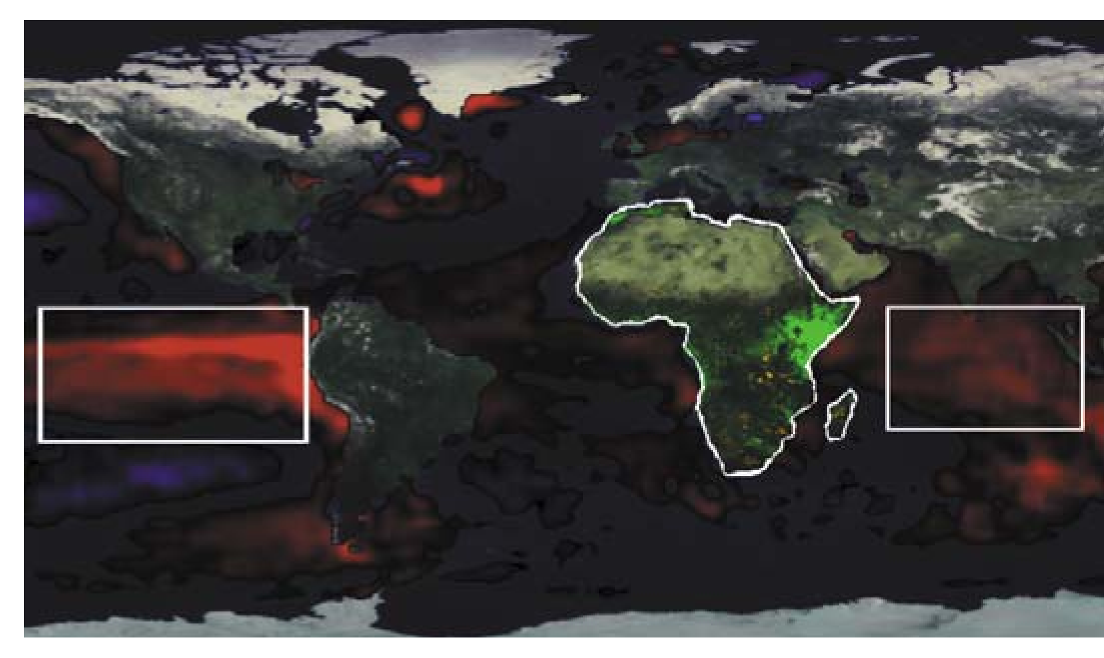
El tiempo y el virus del Nilo Occidental

Este diagrama ofrece una explicación plausible del mecanismo en virtud del cual, en 1999, una ola de calor y unos extremos meteorológicos secuenciales facilitaron el asentamiento del virus del Nilo Occidental en la zona metropolitana de Nueva York. Se ignora si el agente entró en los EE.UU. vía mosquitos, aves o personas. Pero una vez introducido, la interrelación entre los mosquitos y pájaros multiplicó su proliferación.

INVIERNO SUAVE
1
Un número de mosquitos superior al habitual sobrevivió al invierno en cloacas, sótanos húmedos y fuentes de aguas estancadas
La población de mosquitos prosperó en primavera y verano
PRIMAVERA Y VERANO SECOS
2
Muchos pájaros se congregaron en charcas en regresión
La falta de lluvia acabó con los depredadores de mosquitos (ranas, libélulas, mariquitas)
Al evaporarse el agua en los lugares de reproducción, los compuestos orgánicos se concentraron, sirviendo de nutrientes para las larvas de mosquito
LA POBLACION DE MOSQUITOS SE MULTIPLICO
OLA DE CALOR DE JULIO
3
Una vez aparecieron los mosquitos infectados con el virus del Nilo Occidental, el calor promovió la rápida proliferación vírica en su interior
LLUVIAS TORRENCIALES EN AGOSTO
Los aguaceros formaron nuevos lugares de reproducción para los mosquitos, apareciendo así una nueva hornada de insectos
COMENZO EL CIRCULO VICIOSO
4
MOSQUITO INFECTADO
Los mosquitos infectados transmitieron el virus a las aves
MOSQUITO SIN INFECTAR
Los mosquitos inicialmente exentos adquirieron el virus de las aves infectadas
LA INFECCION SE PROPAGO A LAS PERSONAS
Conforme se difundía la infección entre los mosquitos se extendía el virus entre las aves y, finalmente, entre las personas

predadores de ratones: rapaces (lechuzas, águilas, halcones, gavilanes y cernícalos), coyotes y serpientes. Tras la sequía cayeron lluvias torrenciales a principios de 1993, que trajeron abundante comida de saltamontes y piñones para los roedores. La explosión de población resultante permitió a un virus, hasta entonces inactivo o aislado en un pequeño grupo, introducirse en muchos roedores. Cuando la sequía regresó en verano, éstos se acercaron a las casas en busca de alimento y transmitieron la enfermedad a las personas. Hacia el otoño de 1993, el número de roedores había descendido y el brote se redujo.

Los episodios estadounidenses de síndrome pulmonar hantavírico que vinieron después tuvieron un alcance limitado, merced en parte a los sistemas de alerta que indican cuándo se han de reforzar los métodos de control de roedores y en parte a un mayor cuidado de la gente en evitar las deyecciones de animales. Pero la enfermedad ha aparecido en Iberoamérica, donde se han descubierto indicios preocupantes de una posible transmisión intraespecífica, de una persona a otra.



2. ESTA IMAGEN DE SATELITE reveló la elevación de la temperatura de la superficie del mar en la vertiente occidental del océano Indico ecuatorial y en el Pacífico oriental (*cuadros*); nos ofrecía también un cuerno de Africa cubierto de una vegetación exuberante (*verde*) a causa de las abundantes lluvias. Semejante panorama indicaba que el cuerno corría el riesgo de una epidemia de fiebre del valle del Rift, que ataca al ganado y a la población. Con frecuencia creciente se recurre a la vigilancia mediante satélite para detectar la presencia de condiciones inductoras de brotes epidémicos, al objeto de poder tomar medidas preventivas.

Como demuestra el final natural del primer episodio de hantavirus, los ecosistemas acostumbran sobrevivir en condiciones extremas esporádicas. Resultan incluso reforzados con los cambios estacionales de las condiciones meteorológicas, dado que las especies que medran en climas variables deben hacer frente a una gama amplia de valores. Pero los extremos de larga duración y las fluctuaciones drásticas del tiempo pueden arruinar la capacidad de resistencia del ecosistema. (Por botón de muestra: el calentamiento persistente de los océanos constituye una grave amenaza para a los arrecifes de coral, lo mismo que los incendios forestales propiciados por la sequía ponen en riesgo la vida en los bosques.) Y el hundimiento del ecosistema es una de las vías más insidiosas del cambio de clima para atentar contra la salud humana. En el control de las plagas se esconde uno de tantos servicios inestimables que la naturaleza presta al hombre. El buen funcionamiento de los ecosistemas, donde interaccionan especies diversas, mantiene bajo control la población de organismos perjudiciales. Si el creciente calentamiento y los extremos de tiempo degradan los ecosistemas, los desajustes consiguientes permiten el crecimiento de poblaciones oportunistas e intensifican la propagación de la enfermedad.

Agua insalubre

Además de exacerbar las enfermedades transmitidas por vectores a las que antes aludíamos, el calentamiento global elevará probablemente la frecuencia e intensidad de enfermedades ligadas al consumo de agua, entre ellas el cólera (causa de grave diarrea). El propio calentamiento puede contribuir al cambio, como también puede hacerlo la creciente frecuencia y extensión de las inundaciones y las sequías. Quizá parezca extraño que las sequías se alíen con enfermedades ligadas al agua. No lo es si pensamos que agotan los manantiales y concentran contaminantes que en condiciones normales estarían diluidos. Además, la falta de agua clara durante una sequía impide la higiene y la rehidratación de quienes han perdido grandes cantidades de líquido a causa de la diarrea o la fiebre.

De múltiples formas las inundaciones propician las enfermedades ligadas al agua. Barren los alcantarillados y otras fuentes de patógenos (como el *Cryptosporidium*) y los mezclan con depósitos de agua potable, a donde arrastran también los abonos químicos. Fertilizantes y aguas fecales, combinados con agua recalentada, favorecen el desarrollo explosivo de algas dañinas. Algunas de esas eclosiones resultan tóxicas por sí mismas para los humanos que inhalan sus emanaciones; otras contaminan peces y mariscos, cuyas toxinas pasan al hombre en la ingesta. Recientes descubrimientos han revelado una tercera vía perjudicial para la salud. En su desarrollo, las poblaciones algales soportan la proliferación de diversos patógenos, entre ellos la del *Vibrio cholerae*, agente del cólera.

Las lluvias torrenciales traídas al cuerno de Africa en 1997 y 1998 por un océano Indico caldeado ofrecen un ejemplo del modo en que se resienten las poblaciones cuando el calentamiento global engendra inundaciones adicionales. Esas precipitaciones desencadenan epidemias de cólera y dos infecciones transmitidas por mosquitos: la malaria y la fiebre del valle del Rift (enfermedad parecida a la gripe que puede ser letal para el ganado y para los humanos).

Hacia el oeste, el huracán Mitch se detuvo tres días sobre América Central, en octubre de 1998. Alimentada por un Caribe caliente, la tempestad soltó torrentes de agua que mataron a 11.000 personas, por lo menos. Pero eso fue sólo el principio del caos que produjo. Honduras informó de miles de casos de cólera, malaria y dengue, secuelas de su paso. En febrero de este año empezaron a caer lluvias de intensidad inusitada y a desarrollarse una serie de ciclones que inundaron el sur de Africa. Por su causa en Mozambique y Madagascar murieron centenares de personas, millares fueron desplazadas y se propagaron el cólera y la malaria. Esos desastres de la naturaleza pueden también, en las regiones afectadas, retrasar el progreso económico y los avances en salud pública colaterales.

Soluciones

El precio a pagar en salud por el calentamiento global dependerá de las medidas cautelares que se tomen para conjurar los peligros. La estrategia ideal de defensa constaría de múltiples componentes.

De entrada, incorporaría la mejora de los sistemas de vigilancia que detectaran de inmediato la aparición o el resurgimiento de enfermedades infecciosas o de sus vectores. La detección precoz pondría en marcha medidas controladoras de la proliferación de éstos sin dañar el entorno, alertaría al público sobre la autoprotección, suministraría vacunas (si las hubiera) para las poblaciones en peligro y prestaría sin demora el tratamiento oportuno.

Fue esa la pauta seguida en primavera para frenar la expansión del virus del Nilo Occidental en el NE de los Estados Unidos. Al advertir que el virus superó el invierno, la administración sanitaria recomendó la retirada doméstica de cualquier recipiente o adminículo que pudieran contener agua estancada y así evitar la cría de los mosquitos. Introdujo, en los cursos de agua y cuencas de avenamiento, peces que se comen las larvas de los mosquitos. Y echó pastillas insecticidas en los alcantarillados.

Por desgracia, no caben todavía planes exhaustivos de vigilancia en buena parte del globo. Y aun cuando existen vacunas o tratamientos eficaces, muchas regiones carecen de medios de obtenerlas y distribuirlas. Debería ser una prioridad mundial suministrar esas medidas y tratamientos.

Un segundo componente se centraría en predecir el momento en que las condiciones meteorológicas y otras ligadas al entorno pudieran instar la aparición de brotes de enfermedad, a fin de minimizar los riesgos. Si los modelos climáticos señalan la probabilidad de inundaciones en una región dada, la administración debería acomodar los refugios; si las imágenes de satélite y las muestras de aguas costeras revelan el comienzo de formaciones algales relacionadas con los brotes de cólera, habría que aconsejar la filtración del agua de consumo y solicitar a los centros médicos que preparasen personal adicional, camas y medicinas.

La investigación realizada a lo largo de 1999 da cuenta de los frutos que se recogen con la vigilancia mediante satélites. Se demostró que las imágenes que detectaron aguas recalentadas en dos regiones oceánicas específicas y vegetación exuberante en el cuerno de Africa podían predecir con cinco meses de antelación las epidemias de fiebre del valle del Rift. Si esos conocimientos pusieran en marcha campañas de vacunación del ganado, se evitarían posibles epidemias de éste y las personas.

Habría que atajar, y ello sería el tercer factor componente de la estrategia, el propio calentamiento global. Urge limitar las actividades que promueven el calentamiento o redoblan sus efectos. La combustión de carburantes fósiles para producción de energía desempeña, sin duda, un papel destacado en el calentamiento con su emisión de gases "de invernadero": dióxido de carbono y otros absorbentes de calor.

No debe postergarse la puesta en servicio de fuentes más limpias de energía, lo mismo en el mundo industrializado, voraz en su consumo, que en las naciones en vías de desarrollo, de las que no podemos esperar que recorten su uso. (La higiene, el alojamiento, la preparación de los alimentos, la refrigeración y otras combustiones domésticas consumen energía, igual que la necesitan el bombeo y purificación de agua o la desalinización de la misma para el riego.) Al propio tiempo, se impone la recuperación de bosques y humedales para que absorban, aquéllos, dióxido de carbono y, éstos, aguas de las inundaciones, amén de filtrar los contaminantes antes de que alcancen las aguas potables.

El clima, los ecosistemas y la sociedad pueden recuperarse de una tensión siempre y cuando no dure en exceso ni se produzca una concatenación de riesgos. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, establecido por las Naciones Unidas, la suspensión del incremento actual de concentración de gases de invernadero en la atmósfera requeriría un recorte drástico de las emisiones, cifrado en el 60 o 70 por ciento.

Importa que las medidas correctoras eficaces se tomen cuanto antes. El clima no cambia necesariamente de una forma paulatina. Los múltiples factores que operan contra la estabilidad del sistema global podrían inducir una súbita alteración radical. En cualquier momento, el mundo podría volverse de repente mucho más cálido o mucho más frío, con unas consecuencias para la salud que hemos de evitar a toda costa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EMERGENCE OF NEW DISEASE. Richard Levins, Tamara Auerbuch, Uwe Brinkmann, Irina Eckardt, Paul R. Epstein, Tim Ford, Najwa Makhoul, Christina dePossas, Charles Puccia, Andrew Spielman y Mary E. Wilson en *American Scientist*, vol. 82, n.º 1, págs. 52-60; enero/febrero 1994.

CLIMATE CHANGE AND HUMAN HEALTH. Dirigido por Anthony J. McMichael, Andrew Haines, Rudolf Slooff y Sari Kovats. Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa Medioambiental de las Naciones Unidas, 1996.

THE REGIONAL IMPACTS OF CLIMATE CHANGE: AN ASSESSMENT OF VULNERABILITY, 1997. Dirigido por R. T. Watson, M. C. Zinyowera y R. H. Moss. Cambridge University Press, 1997. Resumen acerca del Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático Disponible en www.ipcc.ch/pub/reports.htm.

BIOLOGICAL AND PHYSICAL SIGNS OF CLIMATE CHANTE: FOCUS ON MOSQUITO-BORNE DISEASES. Paul R. Epstein, Henry F. Díaz, Scott Elias, George Grabherr, Nicholas E. Graham, Willem J. M. Martens, Ellen Mosley-Thompson y Joel Susskind en el *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, págs. 409-417; 1998.

Otras páginas Web de interés: www.heatisonline.org y www.med.harvard.edu/chge.

Julie Wakefield

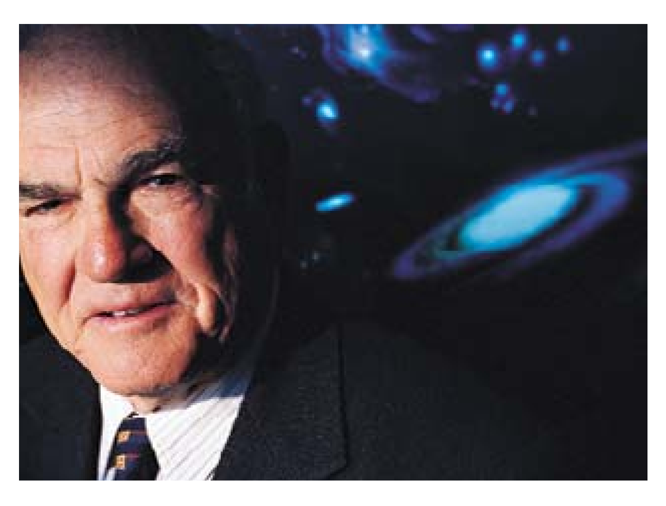
BARUCH S. BLUMBERG: Búsqueda de vida en condiciones extremas

El calor implacable achicharra de tal manera la región de Badwater, en el Valle de la Muerte (California), que algunas zonas tienen la textura de una piel de serpiente disecada. Situado a unos 100 metros bajo el nivel del mar (el punto más bajo de Norteamérica), puede que sea el lugar más caliente de la superficie terrestre. La temperatura llegó una vez a los 53,01 grados Celsius. No abundan por allí los mamíferos, de sangre caliente, lo que hace chocante encontrar a un ganador de un premio Nobel, conocido por su trabajo sobre la hepatitis B. Pero Baruch S. Blumberg se ocupa ahora de algo distinto. En calidad de primer director del NAI, el Instituto de Astrobiología de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), busca formas de vida en condiciones extremas; es decir, el tipo de actividad biológica que la agencia espacial pretende encontrar algún día en otros mundos.

Una vez que se quita la indumentaria para trabajar en el desierto, Blumberg, gran amante de la naturaleza, aparenta diez años menos de los 75 que tiene. Desde el mes de septiembre, cuando accedió a su actual puesto, intenta coordinar un grupo de astrónomos, químicos, ecólogos, geólogos, biólogos, físicos e incluso zoólogos. Está convencido de que los avances de la biología molecular, la exploración espacial y otros diversos campos propician la reconsideración actual de asuntos tan clásicos como los orígenes de la vida y su posible existencia en otros mundos.

Se cuenta con técnicas que permiten descifrar las complejidades de esta cadena de causas y efectos de las que se carecía hace tan sólo cinco años. Blumberg cita en concreto los avances conseguidos gracias al Proyecto Genoma Humano. El anuncio de que posiblemente hubiera materia viva fosilizada en un meteorito marciano conocido como ALH84001, realizado en 1996, conmocionó a todo el mundo. Incluso el Congreso norteamericano, que había liquidado el programa para la búsqueda de inteligencia extraterrestre (SETI) en 1993, se volvió receptivo. En 1998, durante un año sabático en la Universidad de Stanford, Blumberg, junto con muchos otros, contribuyó a fraguar el Proyecto Astrobiológico de la NASA durante una serie de reuniones. El documento de trabajo que redactaron definió el cometido del nuevo instituto.

“El Instituto de Astrobiología de la NASA no implica solamente un cambio del paradigma científico, sino otro de actitud científica, lo cual es más importante”, dice el buscador de planetas extrasolares Geoffrey W. Marcy, de la Universidad estatal de San Francisco. El instituto de Blumberg se está convirtiendo ya en “la base intelectual para un gran número de misiones de la NASA”, en opinión de su administrador, Daniel S. Goldin, quien espera incrementar los 15 millones de dólares del presupuesto del NAI para llegar a los 100 millones dentro de cinco años. El NAI reúne actualmente a unos 430 astrobiólogos de una docena de universidades e instituciones de investigación.



Aunque el instituto aporte nueva credibilidad a la búsqueda de vida extraterrestre, los aficionados a las películas de marcianos no tienen motivos para quedarse deslumbrados. Al revés que el programa SETI, que ahora se financia con aportaciones privadas y que se centra en las comunicaciones radioeléctricas y de otros tipos de presuntos seres conscientes, el NAI apunta a los microorganismos y a otras formas de materia viva aún más primitivas. En concreto se busca vida en condiciones hostiles: en desiertos, en volcanes, en los casquetes polares, miles de metros bajo la superficie de la Tierra o bajo los océanos. Y en Marte, Europa (la Luna de Júpiter), Titán (el satélite de Saturno) e incluso en planetas allende el sistema solar.

Los extremófilos terrestres ofrecen por ahora el arquetipo más probable para poner a prueba la hipótesis de que haya vida en otros lugares. Los investigadores del NAI esperan utilizar bases de datos genéticas de microorganismos clave para relacionar las secuencias evolutivas con sucesos geoquímicos y paleontológicos. Otro proyecto consiste en lanzar microsondas de ADN a bordo de naves espaciales en miniatura para buscar señales de vida. Las respuestas, si es que llegan, pudieran tardar muchos decenios.

Blumberg cree que sus anteriores trabajos bioquímicos le proporcionan una comprensión profunda de las formas de vida, sean o no de este mundo. Según dice, una de las cosas que tienen la medicina y la investigación médica es que se adquiere una especie de afecto por los organismos con los que se trabaja, por lo que surgen espontáneamente preguntas decisivas sobre la vida.

Crecido en el seno de una comunidad de inmigrantes de Brooklyn (Nueva York), Blumberg escrutaba de niño las bibliotecas en busca de libros sobre los exploradores más famosos de la época, entre los que recuerda a Amundsen, Peary, Scott, Shackleton, Rae o Nansen. Piensa que esto tuvo el efecto de hacerle contemplar la ciencia como descubrimiento y también contribuyó a su interés por los trabajos de campo. Todavía

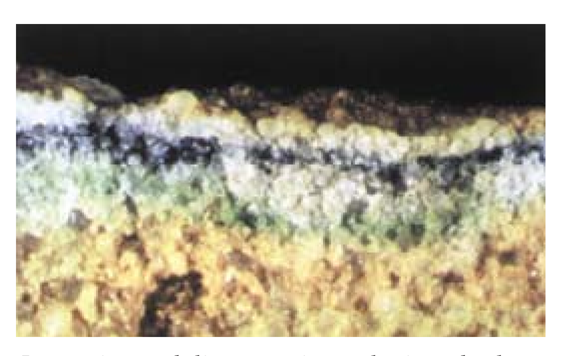
sigue coleccionando libros sobre las primeras exploraciones y sobre las expediciones árticas.

Tras pasar el bachillerato en 1943 en la Far Rockaway High School, se enroló en la Marina y obtuvo la licenciatura en física en el Union College de Schenectady (Nueva York). A los 21 años era capitán de un pequeño navío de la marina de los Estados Unidos. "Es una gran sensación la de trazar un rumbo, tomar unas pocas referencias, apuntar a ojo de buen cubero y acabar más o menos donde se había predicho. Le da a uno confianza en la potencia de la matemática aplicada y en la eficacia de las soluciones racionales." Dirigir a aquella tripulación durante 24 horas al día le confirió una inquebrantable confianza en sí mismo. "Supuse que asumiría el liderazgo de cualquier cosa que hiciera", dice.

En 1946, gracias a las becas concedidas a los soldados, Blumberg comenzó su doctorado en matemáticas en la Universidad de Columbia, pero tan sólo un año después se pasó a la medicina a instancias de su padre, que era abogado. Para realizar su período de residencia, Blumberg escogió los atestados pabellones del Hospital Municipal Bellevue de Nueva York, poco provistos de personal, adonde solían enviar a los pobres y a los enfermos crónicos en la época anterior a los seguros médicos. Bellevue le enseñó una nueva definición de responsabilidad, la de que hay que hacer las cosas y, si uno no lo hace, nadie lo hará.

Provisto del título de doctor, decidió seguir sus propios anhelos científicos y en 1955 se fue a la Universidad de Oxford, donde comenzó su doctorado en bioquímica con Alexander G. Ogston. En aquella época Oxbridge derrochaba entusiasmo con el descubrimiento de la doble hélice del ADN realizado por Watson y Crick. El mismo Blumberg se había admirado de las variaciones de la herencia genética algunos años antes. En 1950 había ido a un desolado hospital de una ciudad minera de Surinam (en Sudamérica), donde, aparte de comprobar las devastadoras consecuencias de las enfermedades infecciosas, observó grandes diferencias en la susceptibilidad al parásito de la elefantiasis entre diversos trabajadores inmigrantes. Una campaña realizada en 1957 en Africa Occidental fue el comienzo formal de su estudio de tales variaciones genéticas, llamadas polimorfismos, que continuaría en el Instituto Nacional de la Salud (NIH).

Blumberg recogió datos sobre la distribución de polimorfismos. Inicialmente tomaba muestras de sangre en busca de indicios sobre la resistencia a la enfermedad. Para encontrar posibles variantes se basó en la respuesta inmunitaria natural, comparando las proteínas de la sangre de pacientes sujetos a frecuentes transfusiones sanguíneas, sobre todo hemofílicos. De los anticuerpos de la sangre del paciente podían remontarse a los antígenos foráneos. Su equipo aisló en 1963 una variante peculiar y la denominó "antígeno australiano". Habitual entre los aborígenes australianos, así como en los habitantes de Micronesia, Vietnam y Taiwan, esta proteína de la sangre era poco frecuente entre los occidentales. Pero la encontraron también en los pacientes de leucemia de los Estados Unidos, que también estaban recibiendo transfusiones. Los investigadores se pusieron manos a la obra para encontrar si el insólito antígeno tenía algo que ver con la susceptibilidad a la leucemia.



Los criptoendolitos —microcolonias de hongos, de algas y de cianobacterias (estratos coloreados)— viven en esta roca arenosa de la fría y seca Antártida: una prueba de que puede darse la vida en condiciones difíciles

En vez de un factor inmunitario heredado, el curioso antígeno superficial resultó ser parte del por entonces misterioso virus de la hepatitis B. Robert H. Purcell, director del laboratorio de hepatitis del NIH, considera que este descubrimiento del antígeno australiano fue la piedra Rosetta para desvelar la naturaleza de los virus de la hepatitis.

También permitió el desarrollo del primer procedimiento de análisis de sangre para determinar la presencia del virus, haciendo así más seguras las donaciones de sangre. El microbiólogo Irving Millman y Blumberg patentaron en 1969 un procedimiento para desarrollar una vacuna contra la hepatitis B. Su novedoso enfoque consistía en purificar las mismas partículas de antígenos superficiales del virus, que por suerte resultó que producían anticuerpos protectores y además no eran infecciosas. Blumberg compartió el premio Nobel de fisiología y medicina de 1976 por sus aportaciones a la comprensión de los mecanismos de las enfermedades infecciosas.

Según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud, una vacuna comercial basada en el método de Blumberg, que ahora se fabrica usando técnicas de recombinación de ADN, ha salvado decenas de millones de vidas. El mantiene su optimismo respecto a la eventual erradicación de la hepatitis B, pero por ahora el virus continúa cobrándose más de un millón de vidas al año.

Cuando no trabaja, a este premio Nobel le gusta ver pájaros, remar en kayac y hasta recoger estiércol en una granja de ganado que posee junto con otros amigos en el oeste de Maryland. "Esa clase de trabajo manual es el antídoto para no pensar demasiado", dice.

Blumberg y otros investigadores, dirigidos por Christopher McKay, del centro Ames de la NASA, emplearon jeringas para extraer microbios termófilos del Valle de la Muerte, para analizar luego su ADN en el laboratorio. Blumberg tiene previsto continuar participando en otras expediciones para recoger extremófilos, quizás al desierto de Gobi (Mongolia) o a la Antártida. Puede incluso que las pruebas de nuevos ingenios robóticos para la exploración planetaria le acaben llevando al Artico canadiense.

Además de la dirección y la inspiración de su equipo, Blumberg quiere utilizar ordenadores potentes para simular la evolución de la vida en otros lugares. Considera que la astrobiología conduce por sí misma a repetidos ejercicios de inducción-deducción, así como a teorías y a la construcción de modelos, señalando con ironía que hay una gran probabilidad de que el modelo sea inadecuado. Da igual. El y sus seguidores esperan que las condiciones que permitieron que la vida surgiera en la Tierra existan en algún otro lugar de la Vía Láctea o más allá. Pudiera ser. En cualquier caso cree que hay que ir y probar.

Paleontología española

Neandertales de la cueva del Sidrón

El estudio de la evolución humana muestra una dilatada trayectoria en distintos países de Europa. En España, sin embargo, la paleoantropología ha padecido un retraso secular, en parte debido a la escasez de fósiles humanos. Afortunadamente, la situación hoy es algo distinta. La explosión de hallazgos de nuevos fósiles humanos en diferentes sitios, muy en particular en Atapuerca, y la investigación que éstos han suscitado, nos va equiparando poco a poco a otros países de nuestro entorno.

Los fósiles humanos rescatados en la Cueva del Sidrón, en Asturias, vienen a unirse a este renovado ímpetu descubridor, dando nueva savia a las ciencias de la evolución del hombre. Los restos de la cueva del Sidrón constituyen una magnífica colección de fósiles humanos, con buena representación de diferentes partes del esqueleto, a excepción del cráneo; se han identificado al menos tres individuos.

Por el momento, se desconoce el contexto estratigráfico y cronológico preciso de los fósiles humanos del Sidrón. No obstante, un primer análisis ya ha revelado datos de gran interés. Una primera labor realizada ha consistido en la caracterización antropológica de estos restos y su asignación a un grupo humano específico. De entre los diferentes elementos esqueléticos conservados, destacan dos mandíbulas en un aceptable estado de conservación.

La mandíbula es un hueso de estructura muy compleja, cuya forma recoge bien las modificaciones evolutivas de los homínidos. Sobre esta base, hemos comparado las mandíbulas del Sidrón con una amplia colección de mandíbulas humanas de yacimientos de Europa, Africa y Asia, para así situar la muestra del Sidrón en un escenario amplio de la evolución humana. Una gran cantidad de caracteres llevan a una conclusión clara y sólida: los restos fósiles del Sidrón pertenecieron a individuos del grupo humano Neandertal. De este modo, y dada la abundancia de restos conservados, se trata de la colección más completa de restos de neandertales descubiertos en la península Ibérica. Para entender mejor el significado de los restos del Sidrón es necesario hablar un poco de los neandertales ¿Quienes eran? ¿Cómo eran?

Hoy sabemos que los neandertales se originaron en Europa a través de un largo proceso de evolución que duró cientos de miles de años, al menos desde hace 500.000 años. Con el tiempo, las características físicas que distinguen a este grupo humano se fueron acentuando para finalizar en lo que se ha llamado los "Neandertales clásicos". Con la expresión "Neandertales clásicos" se designa a las poblaciones humanas que vivieron en Europa durante la primera parte del último período glacial (entre hace 80.000 y 35.000 años): neandertales de La Chapelle-aux-Saints y La Ferrassie en Francia, Guattari en Italia, Spy en Bélgica, etc.

Sin embargo, el uso de la palabra Neandertal puede abarcar períodos más amplios, una vez conocidas sus profundas raíces evolutivas. En la actualidad, un buen número de especialistas consideran que los neandertales fueron una especie distinta de la nuestra (*Homo sapiens*), y son denominados *Homo neanderthalensis*.

Los restos del Sidrón son claramente neandertales, ya que sus mandíbulas presentan las características típicas de esta especie. Uno de sus rasgos más distintivos reside en la posición adelantada de la cara, resultado de un largo proceso de cambio que modificó la región de la nariz y la boca. En este proceso, la mandíbula también cambió su forma; gracias a tales cambios podemos precisar que las mandíbulas del Sidrón pertenecieron a hombres de Neandertal.

Sin embargo, y esto es muy interesante, los restos del Sidrón también presentan unos rasgos que no encajan del todo en la noción de "Neandertal clásico". En particular, los homínidos del Sidrón tenían un esqueleto muy robusto y bien desa-



1. Mandíbula 1 de la Cueva del Sidrón, Asturias. Vista lateral. En la imagen se pueden apreciar algunos caracteres propios de los neandertales. Nótese, por ejemplo, la ausencia de un mentón prominente. Otro rasgo de valor diagnóstico es la posición que ocupa el pequeño agujero nutricio que se abre en la cara externa de la mandíbula, el llamado foramen mentoniano. En la mandíbula 1 del Sidrón, este foramen ocupa una posición baja y retrasada, similar a otras mandíbulas fósiles del Pleistoceno Medio e inicio del Pleistoceno Superior de Europa. Foto: J. Fortea



2. Mandíbula 2 de la Cueva del Sidrón. Vista lateral. Se trata de un espécimen caracterizado por una elevada robustez y una gran altura del cuerpo de la mandíbula. Sus valores se encuentran dentro de la variación detectada en fósiles del Pleistoceno Medio. Es de destacar también la presencia, como en la mandíbula 1, de rasgos típicos del grupo humano neandertal. Entre éstos destaca la posición del foramen mentoniano por debajo del M1 y la aparición de un espacio por detrás de la última muela, lo que se denomina espacio retromolar. Foto: J. Fortea

rrollado. Esta característica, junto con algunos detalles de su anatomía, les hacen parecerse a otras poblaciones que algunos han llamado proto-neandertales, y que vivieron hace más de 80.000 años. A este respecto, nuestros análisis revelan que los restos asturianos se parecen a los de Krapina (Croacia) y, curiosamente, también a los neandertales del Próximo Oriente de Amud y Kebara.

Sin duda, estos resultados plantean algunas preguntas. ¿Qué significan estos parecidos? Hay varias posibilidades, pero dos de ellas merecen particular atención. Por un lado, los parecidos pueden estar informando de diferentes poblaciones dentro de la especie *Homo neanderthalensis*, en concreto diferencias entre poblaciones del norte y del sur. Y por otro, pueden estar dando alguna pista sobre su posible marco cronológico. En este sentido, importa señalar el marco temporal donde podemos empezar a situar los restos humanos del Sidrón.

Pero debe quedar claro que la datación de estos restos no se efectúa con el estudio de su anatomía; la datación se realiza con otros métodos especializados. Sin embargo, el análisis de la morfología nos sugiere algunos datos de su posible escenario cronológico. En primer lugar, dado que el grupo humano neandertal se extinguió hace unos 35.000 años, los restos asturianos deben ser al menos de esta antigüedad. En segundo lugar, por el momento no podemos determinar el límite cronológico inferior. Podemos, no obstante, hacer alguna precisión. Dada su estructura robusta y parecidos morfológicos, no puede descartarse un horizonte cronológico en el tramo final del Pleistoceno Medio (período geológico comprendido entre hace 780.000 y hace 120.000 años).

Con todo lo dicho, cabe concluir que el descubrimiento en Asturias de la colección de fósiles humanos del Sidrón proporciona un hermoso caudal de información para el conocimiento de la evolución humana durante un período del que teníamos muy poco registro paleoantropológico en la península Ibérica. Por el momento tan sólo hemos contestado a la pregunta de su parentesco, pero otras muchas cuestiones quedan en el aire. Los restos del Sidrón son, sin duda, de un elevado interés científico.

ANTONIO ROSAS
EMILIANO AGUIRRE
Museo Nacional de Ciencias
Naturales, CSIC

Corteza cerebral

Modelo neurogenético

La estructura más compleja del sistema nervioso central (SNC) de mamíferos está en la superficie de los hemisferios cerebrales y se llama corteza cerebral. Se distribuye bajo una serie de pliegues de la superficie hemisférica, o circunvoluciones cerebrales. Vista al microscopio, la corteza consiste en capas de neuronas de formas y funciones diversas. La observación de diferencias regionales, en tipos celulares y su distribución, generó un mapa de regiones anatómicas denominadas áreas de Brodmann, en honor de su descubridor.

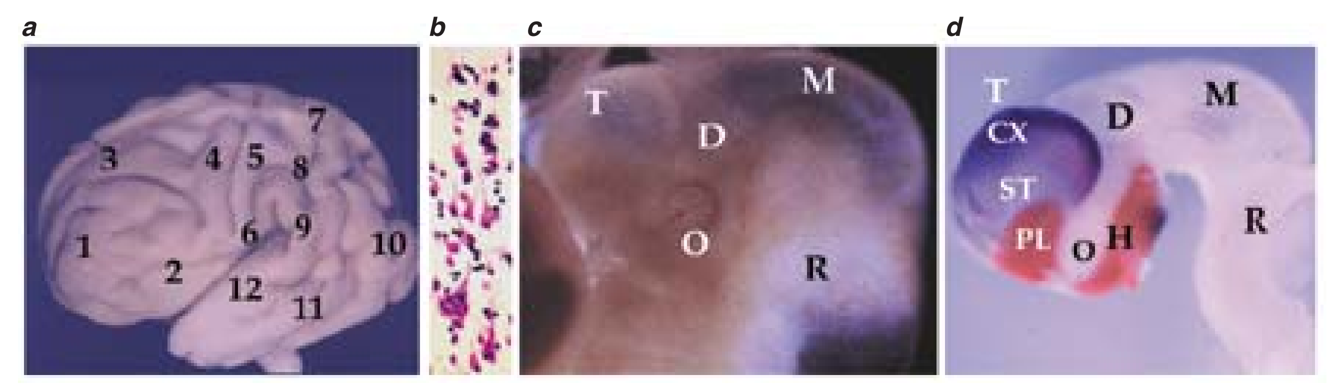
Los estudios realizados en los años cincuenta, por Wilder Penfield en pacientes sometidos a intervenciones en el cerebro con anestesia local, ampliados con las modernas técnicas exploratorias, han demostrado la existencia de una especialización funcional de las áreas corticales. Se advierte un estrecho paralelismo entre los mapas estructurales con los de áreas funcionales, reflejo de una íntima relación entre estructura y función de la corteza cerebral.

Compete a la corteza realizar el procesamiento neuronal de las sensaciones, generar los actos motores voluntarios, integrar las actividades sensoriales y motoras, aprender y generar el lenguaje y las emociones. Estas funciones se ejecutan mediante la activación de circuitos neuronales integrados en sistemas modulares, que se distribuyen en regiones específicas del hemisferio cerebral según su actividad.

Con el estudio de procesos que afectan al cerebro de forma localizada y de la actividad cerebral durante la realización de una tarea se conocen las funciones dependientes de las diferentes áreas de la corteza. Se puede así levantar el mapa de "áreas funcionales corticales".

En la región anterior del SNC del embrión se puede ver muy tempranamente (hacia el día 30 de gestación en el hombre) el crecimiento de dos procesos que formarán una vesícula a cada lado, los futuros hemisferios cerebrales. En la pared de estas vesículas telencefálicas se construirá la corteza cerebral.

Primero, las vesículas aumentarán en tamaño. Después, se irán generando neuronas que se incorporarán a las capas más superficiales de su



Visión lateral del hemisferio cerebral izquierdo de un feto humano de 8 meses (a). *Los surcos y circunvoluciones cerebrales son visibles y definen las áreas funcionales del neocórtex: 1, corteza prefrontal (motivación); 2, área motora del lenguaje; 3, área premotora (programación de movimientos); 4, área motora (realización de movimientos voluntarios); 5, área sensorial general (sensaciones corporales); 6, área sensorial visceral; 7, área sensorial secundaria (integración sensorial y motora); 8, área de asociación multimodal (sensaciones corporales, visión); 9, área de comprensión del lenguaje; 10, áreas visuales; 11, lóbulo temporal (análisis visual, memoria y emoción); 12, área auditiva. Microfotografía de la corteza cerebral humana teñida con una técnica que colorea las neuronas de color violeta* (b). *Disposición en capas de los diferentes tipos celulares (poligonales y piramidales). Fotografía de la cabeza de un embrión humano de 4 semanas de gestación* (c). *Las diferentes partes del cerebro son visibles por transparencia. D: diencéfalo; M: mesencéfalo; O: copa óptica (ojo); R: rombencéfalo; T: telencéfalo (hemisferio cerebral izquierdo). Región anterior del sistema nervioso central de un embrión de ratón de 10 días de gestación (equivalente a 4 semanas del desarrollo humano)* (d). *La expresión de dos genes de desarrollo se ha detectado por hibridación* in situ. *La expresión de Emx2 en la región del neocórtex se ha revelado en color azul; la expresión de Nkx2.1 en la parte inferior, futura región hipotalámica y el pálido, se ha revelado en color rojo. CX: esbozo del neocórtex; D: diencéfalo; M: mesencéfalo; H: hipotálamo; O: tallo óptico; PL: pálido; ST: estriado; R: rombencéfalo; T: telencéfalo*

pared. Por eso, en la pared del telencéfalo se ha formado una capa de neuronas inmaduras, la placa cortical. En la región de la placa cortical de la cúpula de la vesícula telencefálica se desarrollará la porción neocortical o neocórtex.

Mecanismos posteriores, que duran hasta las primeras semanas de vida postnatal, generarán la aparición de las características particulares de las áreas funcionales del neocórtex. Pueden darse cambios menores, en conexiones neuronales, a lo largo de toda la vida, siendo esto lo que permite la recuperación tras lesiones cerebrales en las personas adultas.

Para explicar el desarrollo de estas áreas funcionales del neocórtex se han propuesto dos hipótesis. Una postula que en la pared de la vesícula telencefálica se genera un prototipo de estructura cortical, donde no existe ninguna diferenciación interna. En este modelo del protocórtex, toda la extensión de la placa cortical es equivalente para su posterior regionalización. Sobre tal estructura indiferenciada las conexiones axonales procedentes del tálamo (región situada entre los hemisferios cerebrales), impondrían un desarrollo diferencial.

El modelo neurogenético constituye la hipótesis alternativa. De acuerdo con el mismo, la placa cortical presenta una regionalización intrínseca preestablecida. Aquí el papel más importante se otorga a un esquema previo de información, implícito en la placa cortical. Para ello, la sucesión de procesos de regionalización precoz del esbozo neural, con la expresión diferencial de genes de desarrollo, han ido generando la información necesaria para la aparición de las áreas funcionales del adulto.

Durante los últimos años hemos estado trabajando en la identificación de genes que se expresan en el sistema nervioso central del embrión. Queríamos conocer la misión de estas expresiones en el desarrollo de las áreas funcionales de la corteza cerebral. Era necesario separar los dos elementos implicados en su aparición, proyecciones talámicas y regionalización intrínseca, para trabajar de forma individualizada sobre ellos. El modelo de estudio nos lo han proporcionado ratones con mutaciones inducidas en genes precisos (*knock-outs*), en especial en el gen *Gbx2*. Estos ratones mutantes del gen *Gbx2* presentaron, entre otras alteraciones del cerebro, una total ausencia de la proyección talamo-cortical.

Según la hipótesis del "protocórtex" los animales no presentarían ninguna característica de regionalización del neocórtex. Según el modelo neurogenético sí debería existir regionalización.

El experimento resultó determinante. La placa cortical de estos ratones mutantes mostraba las mismas características regionales que sus hermanos controles, con la proyección talamo-cortical normal. Demostramos así que el desarrollo de las características estructurales y funcionales de las áreas de la corteza cerebral se halla regulado inicialmente por mecanismos genéticos.

El papel morfogenético de las fibras talámicas sobre la corteza cerebral no consiste en establecer las áreas funcionales, sino en desencadenar mecanismos más tardíos de diferenciación. En los cromosomas está la información morfogenética para el desarrollo de la compleja estructura cerebral, y dentro de esta información se encuentra el desarrollo de la unidad anatomo-funcional de la corteza cerebral.

Salvador Martínez
Dpto. Ciencias Morfológicas.
Facultad de Medicina
Universidad de Murcia
Instituto de Neurociencias
UMH,
San Juan de Alicante

Turberas

Mercurio y cambio climático

El mercurio es un elemento que presenta un peculiar comportamiento geoquímico. Volátil a temperatura ambiente, en su forma elemental (Hg) tiene un elevado tiempo medio de residencia en la atmósfera (1 año) y está sujeto a transporte de largo recorrido y a procesos de homogeneización de su concentración a escala hemisférica.

Parte del Hg presente en la atmósfera pasa a la superficie terrestre mediante deposición seca (polvo) o húmeda (aportado por la lluvia y las nieblas). Una vez en el suelo, su retención y especiación estará relacionada con los componentes y las propiedades físico-químicas del medio. Su acumulación neta en un ecosistema dependerá, pues, de estos factores, pero también las condiciones climáticas desempeñan un papel determinante en el balance entre deposición y acumulación.

Ciertos tipos de humedales se encuentran entre los registros naturales más adecuados para el estudio de las variaciones temporales de la concentración de componentes atmosféricos; muy en particular las turberas ombrotróficas, cuya alimentación se realiza exclusivamente por la atmósfera. Las turberas se forman por acumulación de restos vegetales, en las que predominan los musgos, en unas condiciones muy restrictivas para la descomposición de la materia orgánica. En el noroeste peninsular, la tasa media de crecimiento es de 1 cm cada 20-25 años. Las turberas ombrotróficas presentan siempre una superficie activa para la captación de elementos procedentes de la atmósfera, que acabará enterrada con el tiempo debido al proceso de acreción orgánica. Por otra parte, ya que el material de que están formadas contiene elevadas proporciones de carbono, podemos servirnos de técnicas de radiocarbono para conocer la edad de los distintos niveles y así reconstruir la evolución de la acumulación a lo largo del tiempo.

Partiendo de estas premisas, el Grupo de Investigación en Paleoambiente de la Universidad de Santiago de Compostela llevó a cabo un estudio sobre la concentración y estabilidad térmica del Hg acumulado en una turbera ombrotrófica de la Sierra del Xistral (Lugo).

De la comparación con el registro paleoclimático resultó evidente que existía una estrecha relación entre la acumulación de mercurio y los cambios climáticos. Los climas fríos provocan un aumento en la acumulación de Hg y una elevada proporción del mismo es de baja estabilidad térmica (más del 50 % del Hg de la turba se perdió al calentar a 30 ºC). Los climas cálidos originan, por contra, una acumulación hasta 5 veces inferior y las formas de Hg son de estabilidad moderada a muy alta (retenidas incluso tras calentar a 105 ºC).

El modelo matemático obtenido a partir de esta relación permitió una reconstrucción de los cambios de temperatura ocurridos en el NW de la península Ibérica durante el Holoceno reciente (últimos 4000 años), expre-



1. Turberas ombrotróficas de cobertor en las cumbres de Pena da Cadela (Serra do Xistral, Lugo). Este tipo de humedales de montaña reúne las características apropiadas para llevar a cabo la reconstrucción de las variaciones de la composición atmosférica a escalas de miles de años

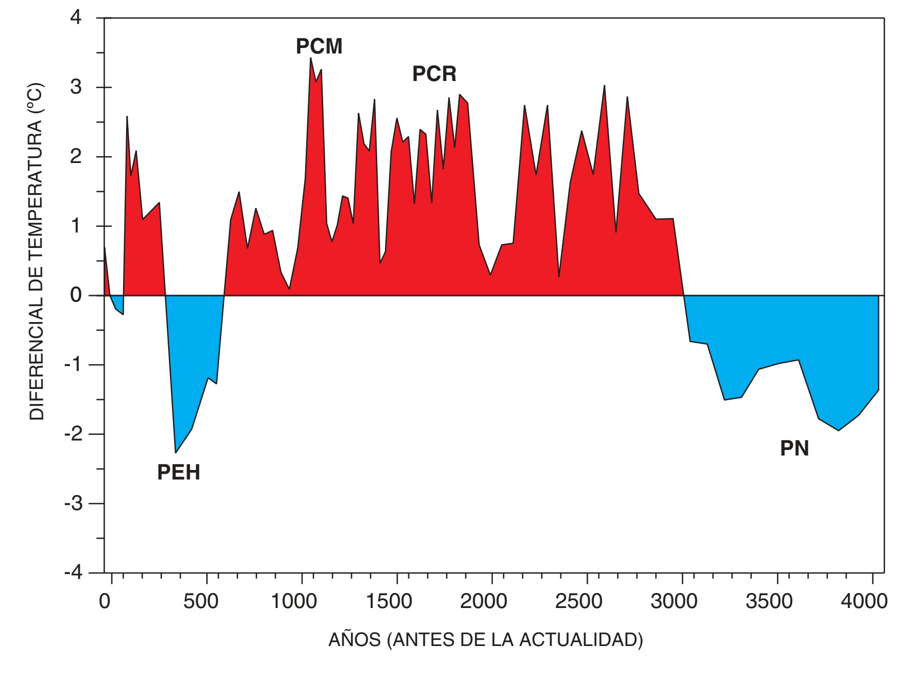
sados como ΔT (diferencia de temperatura frente a la media actual). Las temperaturas parecen haber oscilado de forma brusca a distintas escalas temporales, desde un intenso período frío, el de la *Neoglaciación*, que terminó hace unos 3000 años. Durante el mismo, las temperaturas se mantuvieron siempre por debajo de las medias actuales (hasta 2 grados menos, ΔT = –2 ºC).

Tras una evolución irregular, el calentamiento subsiguiente a la Neoglaciación se estabilizó entre hace 2000 y 1500 años antes del presente. Se trata del *Período Cálido Romano*, con valores de ΔT de +2,5º a +3,0 ºC. Hacia el 1500 antes de la actualidad ocurrió un breve período de degradación climática, con un descenso de la temperatura media anual de 2 ºC respecto a la del período anterior. La brevedad de este episodio y la rápida recuperación hacia temperaturas similares a las de época romana, son un aspecto singular de la evolución climática del NW peninsular pues, tal como indica Font Tullot en su libro *Historia del Clima de España*, el resto de la península Ibérica y el sudoeste europeo se vieron inmersos en un período frío.

Según Font Tullot, en este *Episodio Frío Altomedieval*, la circulación atmosférica dominante (un anticiclón nor-centroeuropeo flanqueado por dos sectores de bajas presiones, uno en Islandia y otro en el norte de Africa) provocaría el arrastre de masas de aire frías centroeuropeas y siberianas hacia la cuenca mediterránea, originando allí fuertes adversidades climatológicas, pero a su vez facilitaría el acceso de masas de aire oceánico cálido del sur y sudoeste sobre Galicia, creando unas condiciones climáticas en claro contraste con las del resto de España.

El siguiente período importante fue el *Episodio Cálido Bajomedieval*, centrado hace unos 1000 años antes de la actualidad, con ΔT de hasta +3 ºC. Con posterioridad, las temperaturas bajaron para estabilizarse en torno a +1 ºC sobre la media actual.

Por último, sufrieron un brusco descenso que dio lugar a la *Pequeña Edad del Hielo*, período que se ini-



2. Evolución del diferencial de temperaturas en los últimos 4000 años para el noroeste de la península Ibérica (PEH: Pequeña edad del hielo; PCM: Período cálido medieval; PCR: Período cálido romano; PN: Período de la neoglaciación)

ciaría hacia mediados del siglo XV y terminaría en el XVIII. Ese episodio supuso una de las épocas recientes de mayor intensidad de frío, con un ΔT de hasta –2,5 ºC. El siglo XVIII es de clara recuperación térmica, consolidada durante el siglo XIX, en plena revolución industrial.

A finales del siglo XIX las temperaturas disminuyen de nuevo en el NW, algo que también muestran los registros de las estaciones meteorológicas de serie larga del norte de la Península. Según algunos autores, la intensidad de este descenso es de unos 2º a 3 ºC. En Galicia los resultados obtenidos a partir de la concentración de mercurio en las turberas son similares, de tal forma que el siglo XX comienza con un enfriamiento notable. A pesar de ello, el devenir de este último siglo es el de un calentamiento progresivo, en torno a 1 ºC (ΔT de –0,3 ºC a +0,6 ºC). Esto es coherente con las predicciones hechas por diversos autores y con las aportadas en el documento elaborado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.

No obstante, en lo concerniente a la intensidad del cambio operado en el siglo XX, el registro muestra que habría habido variaciones de similar o mayor intensidad en los últimos 4000 años, lo que debe interpretarse en el sentido de que la variabilidad climática natural introduce un factor de incertidumbre a la hora de valorar el impacto que las actividades humanas, por medio de la emisión de gases con efecto invernadero, puedan tener sobre el cambio climático.

De ese modo, las turberas, además de ecosistemas de gran interés ecológico (por la especial flora que las coloniza, la fauna que las habita y su papel en la regulación hidrológica), constituyen archivos naturales que han registrado la historia del clima del pasado, la actividad del hombre, su influencia en las condiciones del ambiente y su papel en el cambio global.

Aunque parte de este registro ha comenzado a descifrarse en tiempos recientes, queda gran cantidad de información todavía oculta en las turberas. Se impone, pues, proteger y conservar esos ecosistemas.

ANTONIO MARTÍNEZ CORTIZAS
XAVIER PONTEVEDRA POMBAL
EDUARDO GARCÍA-RODEJA
JUAN CARLOS NÓVOA
Dpto. Edafología y Química Agrícola
Facultad de Biología
de Santiago de Compostela

Tratamiento de las aguas residuales

El lagunaje

El incremento de las actividades cuyos vertidos y productos residuales provocan la contaminación y degradación de las aguas, sumado a que éstas constituyen un recurso natural cada vez más escaso, exigen un tratamiento de las aguas residuales para su posterior reutilización.

El tratamiento de las aguas residuales consiste en la aplicación de unas operaciones básicas o unitarias cuya secuencia y utilización vienen definidas por el grado de depuración a alcanzar, las características del agua a tratar y el coste de las instalaciones.

Puede distinguirse tres grandes grupos de tratamientos físicos en función del tipo de contaminantes a eliminar: tratamientos previos o pretratamientos (desbaste, dilacerado, desarenado, desengrasado y desaceitado), que se llevan a cabo al comienzo del tratamiento con el fin de evitar riesgos al resto de las instalaciones que componen la planta; eliminación de sólidos en suspensión (decantación o sedimentación, flotación, filtración), y eliminación de sólidos disueltos (concentración por evaporación total o parcial del agua, extracción con disolventes específicos, adsorción con carbón activo, ósmosis inversa, electrodiálisis y otros).

En los tratamientos químicos la eliminación de contaminantes se lleva a cabo mediante una reacción de neutralización, precipitación u oxidación-reducción. Debido a que las reacciones químicas se producen entre determinados compuestos, estos procesos son muy selectivos. También se incluye dentro de este grupo la coagulación-floculación, que desestabiliza los coloides por adición de determinados compuestos químicos, así como la desinfección, que consiste en una oxidación con cloro, hipoclorito, ozono u otros reactivos.

Compete a los tratamientos biológicos eliminar la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, a través de procesos o reacciones con intervención de microorganismos. Estos procesos pueden ser de tipo aerobio (fangos activados, lechos bacterianos) o anaerobio.

Los contaminantes separados en el proceso de depuración del agua se concentran en forma de fangos, que se someterán a procesos que reduzcan su capacidad de fermentación y su volumen. De una forma secuencial se numeran la concentración (espesamiento, flotación, centrifugación), estabilización (digestión aerobia o anaerobia), acondicionamiento (adición de reactivos) y deshidratación (eras de secado, filtros de vacío, filtros prensa, filtros banda, centrifugación). Posteriormente, estos fangos pasarán a un vertedero controlado o se emplearán en relleno de terrenos o en abono para el campo.

Para salir al paso del enorme coste de los tratamientos de depuración se han ideado técnicas alternativas más económicas. De todas éstas, el lagunaje es, hoy día, la más extendida.

El lagunaje aprovecha y potencia los procesos de depuración físicos, químicos y biológicos que ocurren de forma espontánea en la natura-



Vista parcial de la depuradora de lagunaje de Alguazas (Murcia)

leza. Estos sistemas necesitan grandes superficies de terreno y presentan bajos costes de inversión y mantenimiento. Proporcionan, además, un efluente de calidad muchas veces incluso superior al obtenido con una depuradora convencional.

La depuración de aguas residuales por lagunaje no requiere más energía externa que la radiación solar. Debido a la gran disponibilidad de nutrientes y materia orgánica, se origina un intenso crecimiento algal con una gran producción de oxígeno fotosintético, que se aplica a la degradación de la materia orgánica. El efluente de estos sistemas puede emplearse directamente para riego.

MERCEDES LLORÉNS
PASCUAL DEL RIQUELME
Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Murcia

Espectrometría atómica analítica

Naturaleza, posibilidades y futuro

Al definir la naturaleza de esta disciplina importa comprender que su objetivo intrínseco es el análisis químico elemental. Para ello, la muestra a analizar se descompone cuantitativamente en sus elementos constitutivos; luego, los fotones característicos o los iones de cada tipo, formados en la fuente/atomizador, se separan según su naturaleza. A continuación, se cuentan los fotones de cada tipo que la muestra atomizada proporciona. Este resultado analítico da la concentración de los elementos en la muestra (*véase diagrama*).

Clásicamente dicha información se basó en la medida o contaje de fotones. Los átomos o iones del atomizador interaccionan de forma diferencial con la radiación electromagnética. Los tipos habituales de análisis espectral atómico consisten en medir la absorción selectiva de fotones de una fuente externa de radiación (lámpara) por los átomos de la muestra (absorción) o, por el contrario, medir los fotones emitidos por los átomos de la muestra excitada en el atomizador (emisión). Así surgieron las técnicas de absorción atómica de llama, absorción atómica con horno de grafito, emisión atómica de llama y emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES).

Hasta los años ochenta se daba por hecho que el empleo de los fotones era consustancial a la espectrometría atómica analítica. Pero en el decenio siguiente se asistió al establecimiento definitivo de la espectrometría de masas acoplada inductivamente con plasma (ICP-MS), donde la medida de los "fotones de interacción" con la materia se sustituye por la medida directa de los iones elementales constituyentes de esa materia.

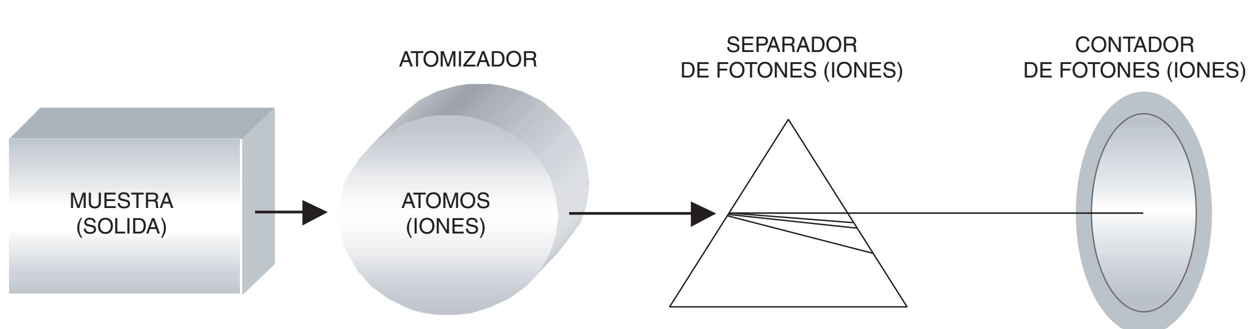
La sensibilidad que el ICP-MS proporciona, su capacidad multielemental para analizar virtualmente todos los elementos metálicos y semimetálicos de forma casi simultánea y su capacidad de ofrecer medidas y relaciones isotópicas explican el desarrollo explosivo de esta técnica, que constituye hoy el detector atómico más poderoso del análisis químico.

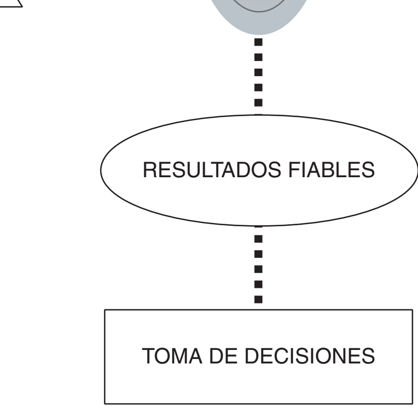
Las técnicas y métodos de la espectrometría atómica dominan el análisis elemental inorgánico. Al final de la Segunda Guerra Mundial los métodos atómicos eran ya multielemento, pero tenían una sensibilidad moderada, de parte por millón o miligramo por gramo. Los análisis requerían destreza, mucho entrenamiento, tiempo y paciencia por parte de analista; recuérdese, por ejemplo, la espectrografía de arco.

Sin embargo, la investigación a lo largo de este medio siglo ha ido poniendo a nuestra disposición un riquísimo abanico de técnicas atómicas capaces de ofrecer límites de detección rutinarios en el intervalo de los nanogramos por litro, una selectividad muy alta, capacidad de análisis directo, velocidad de los análisis cifrada en cientos de muestras por hora, química "en línea" con los instrumentos, informatización de los aparatos, sistemas de detección muy potentes e información isotópica inmediata, así como información de la "compartimentación" de los elementos traza en los organismos y "especiación" de los mismos en los sistemas más variados a niveles de ultratrazas.

Durante muchos años el objetivo principal de la espectrometría atómica analítica ha sido proporcionar información "atómica" (elemental) de la composición de la materia. En el camino, los espectroscopistas atómicos nos hemos ido "divorciando" de las corrientes básicas en química (basadas en el enlace, en las moléculas), empeñados en el desarrollo del conocimiento básico, la instrumentación precisa y las aplicaciones adecuadas para la determinación de casi todos los elementos de la tabla periódica.

Sin embargo, la espectroscopía atómica de hoy está en un estado de cambio, tratando de reconducir su investigación y aplicaciones hacia sus posibilidades "químicas", aportando





Esquema general del espectrómetro atómico

información molecular, de los compuestos en que se hallan los elementos.

Este cambio en las metas y objetivo final de la disciplina ha venido acompañado por la renovación de herramientas y métodos. Al éxito de la técnica ICP-MS se debe que las fuentes espectroquímicas clásicas (utilizadas para atomización/excitación de la materia) se investiguen como fuentes de ionización para acoplarlas virtualmente a todo tipo de analizadores de masas.

Ese éxito de la integración de la espectrometría atómica tradicional (de los fotones) con los "analizadores de masas" (detectores directos de los iones de los elementos buscados) explica el desasosiego de los "viejos" espectroscopistas atómicos que temen un próximo fin de la "era de los fotones" y el establecimiento definitivo del "imperio de los iones".

Además, con objeto de extender el potencial analítico de la espectrometría atómica a moléculas y compuestos ("especiación" de metales), estamos asistiendo también a una extensión de los detectores atómicos en dos direcciones: la primera consiste en la hibridación o acoplamiento de una técnica potente de separación de especies o compuestos con los detectores atómicos disponibles en el mercado (de fotones y, sobre todo, de iones); la segunda dirección investiga nueva instrumentación de espectrometría de masas capaz de proporcionar espectros atómicos (información elemental) que, en el mismo instrumento, puedan también proporcionar, por un simple cambio de condiciones de la ionización, espectros de los fragmentos moleculares (información del compuesto).

El modelo clásico de la espectrometría atómica analítica "medida de fotones/información elemental" está cambiando. Asistimos a una especie de "crisis de identidad" de la disciplina: sus objetivos se hacen más ambiciosos (información atómica y molecular), los detectores son cada vez más poderosos (basados en la medida de fotones y de iones) y sus acoplamientos con otra técnicas cada vez más imaginativos y útiles.

ALFREDO SANZ MEDEL
Dpto. de Química Física y Analítica
Facultad de Química de la Universidad de Oviedo

Estrategias de adaptación

Plantas con frutos subterráneos

En ambientes inestables e impredecibles constituye una ventaja que las plantas dispongan de varias opciones reproductoras, sin verse obligadas a seguir un modelo rígido de desarrollo. Por ejemplo hay especies que producen flores normales, abiertas y cuya polinización depende de los insectos (flores casmógamas), y además un segundo tipo de flores, más pequeñas, que no se abren y recurren a la autopolinización (flores cleistógamas).

Otras veces, una misma planta produce distintos tipos de frutos (heterocarpia), que desempeñan cometidos diferentes en la biología de la especie en cuestión. Los frutos producidos pueden diferir en morfología, tipo de dispersión o características germinativas; y las plantas resultantes de sus semillas puede tener distintas posibilidades competitivas y reproductoras.

La producción en una misma planta de frutos aéreos y subterráneos se llama anficarpia. Constituye otra estrategia múltiple de reproducción. Sólo una treintena de especies presentan, que se sepa, el fenómeno de la anficarpia; distribuidas en 10 familias, la mayoría de las especies anficárpicas son anuales y viven en lugares áridos o semiáridos.

Los frutos subterráneos proceden unas veces, de flores formadas bajo tierra y cleistógamas; otras veces, de flores situadas en la base de los tallos, a ras del suelo. En este segundo caso, las flores pueden ser cleistógamas o normales; los frutos terminan enterrados por contracción de las raíces y maduran bajo tierra. Los frutos aéreos proceden de flores normales.

Los frutos aéreos difieren de los subterráneos no sólo por el lugar donde se desarrollan. Pueden diferir también en el momento en que se producen, en el número, tamaño y peso, forma de dispersión, nivel de variabilidad genética, vigor y habilidad competitiva y reproductora de las plantas que originan. A veces, incluso en las características germinativas.

Los frutos subterráneos se originan cuando las plantas se encuentran todavía en estado juvenil; antes, pues, que los aéreos. Suelen darse en número escaso (entre 1-20), más o menos constante y con cierta independencia de las condiciones de crecimiento y del tamaño final de las plantas.

Por contra, los frutos aéreos, al desarrollarse más tarde y depender de las condiciones existentes durante el período de crecimiento, su número



1. Planta juvenil de Catananche lutea *(Asteraceae), una especie anficárpica mediterránea. Muestra los capítulos basales en flor. Posteriormente, estos capítulos quedarán enterrados y sus frutos madurarán bajo tierra*



2. *Planta madura de* Catananche lutea. *Capítulos subterráneos en fruto* (a). *Capítulos aéreos en flor* (b)

(variable entre 0 y 1500) guarda una estrecha correlación con el tamaño final que alcanzan las plantas. En los años favorables se producen muchos más frutos aéreos que subterráneos, pero en años adversos o en condiciones de dura competición las plantas, pequeñas y con dificultades de desarrollo, invierten la mayor parte de la energía en la fructificación subterránea, a veces la única que aparece.

A diferencia de lo que observamos en los frutos aéreos, la dispersión de las semillas de los subterráneos se halla muy limitada. De un modo excepcional, los frutos producidos a partir de rizomas se alejarán hasta 2 metros; pero lo habitual es que se reúnan en grupos, junto a las raíces de la planta madre. En compensación, su instalación bajo tierra les protege contra la depredación, desecación, temperaturas extremas y el fuego, factor este que de forma periódica suele presentarse en su medio.

Por otro lado, los frutos subterráneos son de mayor tamaño y más pesados: entre un 95 y un 70 por ciento más. Al tener un embrión con más reservas sus semillas producen plántulas más vigorosas, lo que facilita la supervivencia en condiciones de estrés ambiental. Además, crecen en microentornos favorables donde se ha desarrollado y reproducido la planta madre. Comparadas con las plantas producidas por los frutos aéreos, las originadas por los subterráneos son más tolerantes a la sequía y a la competencia.

Aunque no todo son ventajas en la reproducción por medio de frutos subterráneos. Ante la falta de espacio, se asiste a una intensa competencia entre plantas hermanas. También estos frutos demandan mayores requerimientos energéticos en razón de su tamaño. Sin olvidar la ausencia de intercambio génico debido a que la mayoría de estos frutos proceden de flores autofecundables.

Los frutos aéreos, procedentes de flores abiertas y a menudo con polinización cruzada, evidencian, por contra, un alto potencial para el flujo génico. Merced a su capacidad para dispersarse evitan la competencia entre plantas hermanas. Pero no podemos omitir que esta propiedad frena, sin embargo, sus probabilidades de éxito: puede llevarlos a ambientes hostiles y producen plántulas menos vigorosas, que compiten peor.

La doble estrategia reproductora que presentan las plantas anficárpicas se la conoce por estrategia "optimista/pesimista". Optan por la estrategia "pesimista" las especies que viven en ambientes inestables o alterados, donde la supervivencia de las plantas hasta el fin del crecimiento no está garantizada. Bajo estas condiciones, la selección privilegia a las plantas que producen frutos tempraneros. Prefieren la estrategia "optimista" aquellas otras que tienen asegurada la supervivencia y la reproducción por vivir en un medio muy estable. Aquí el estado vegetativo se prolonga antes de comenzar la reproducción, con el fin de maximizar la fructificación.

En las especies anficárpicas la producción de frutos subterráneos se ajusta a la estrategia "pesimista". Lo que quiere decir que aparecen antes y se hallan mejor protegidos. Si las condiciones ambientales continúan siendo favorables, las plantas prosiguen su desarrollo y terminan por producir frutos aéreos; es la estrategia "optimista". Los frutos aéreos expanden, merced a la dispersión de las semillas, su área de asentamiento, mientras que los frutos subterráneos representan un medio más seguro de reproducción y aseguran la persistencia "in situ" de las poblaciones.

EMILIO RUIZ DE CLAVIJO JIMÉNEZ
Departamento de Biología Vegetal
Facultad de Ciencias
Universidad de Córdoba

Ciclo celular

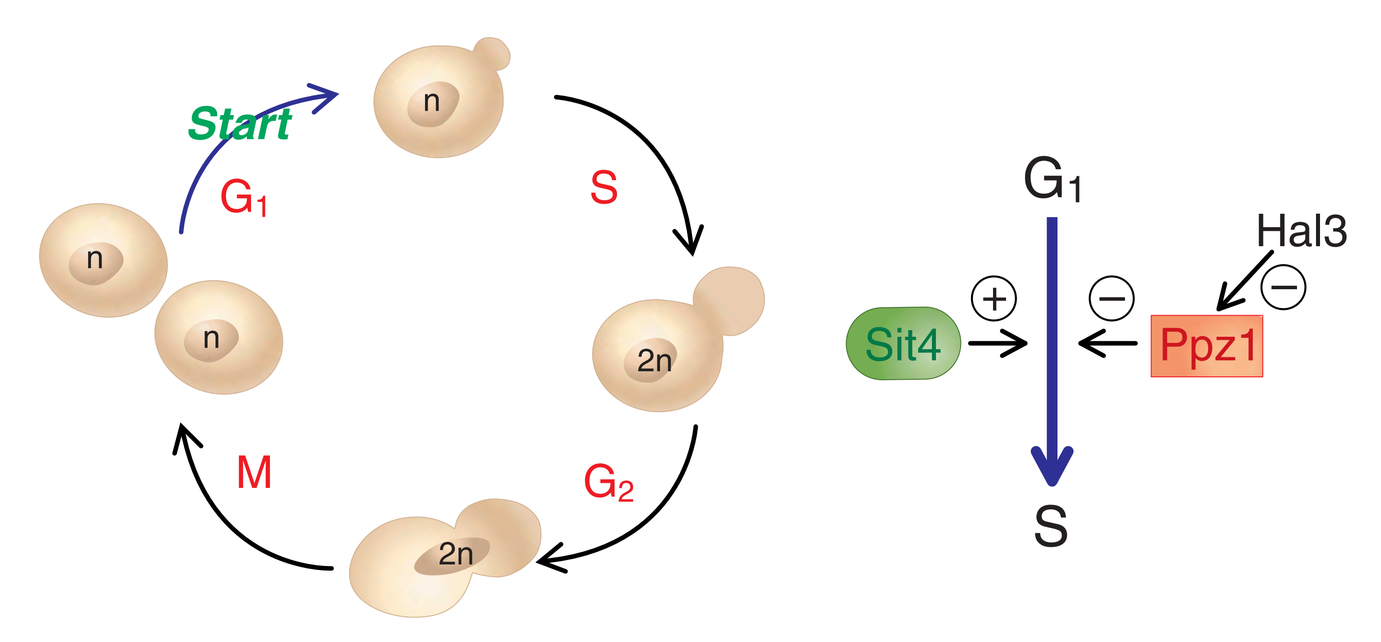
Compleja regulación

La generación de dos células hijas a partir de una célula precursora, a través de una serie ordenada de sucesos, constituye el ciclo celular. De dicha secuencia participan la replicación del material genético (ADN), la mitosis y la citoquinesis.

En las células eucariotas, dotadas de núcleo diferenciado, el ciclo se descompone en cuatro fases. Así, entre el período durante el cual el ADN se replica (fase S) y la mitosis (fase M), median las fases G_1 y G_2, de duración variable según el tipo de célula. Este modelo de progresión tiene un carácter general, si bien ciertos aspectos, relativos a los mecanismos de su regulación, pueden diferir en razón del tipo de célula.

La investigación halla en el comportamiento de *Saccharomyces cerevisiae* el organismo ideal para ahondar en la bioquímica de la regulación del ciclo celular. A lo largo del ciclo, la levadura debe ejecutar una serie de decisiones de suma importancia. Por ejemplo, la de iniciar un nuevo ciclo celular, que se toma en un momento relativamente avanzado de la fase G_1. Esta decisión, que equivale a cruzar una línea sin retorno que denominamos "Start", conlleva el comienzo de tres procesos claves para el correcto desarrollo del ciclo: la formación de la gema (esta levadura se reproduce por gemación), la duplicación del cuerpo basal del huso (estructura equivalente al centriolo) y la duplicación del ADN.

La ejecución de los tres procesos requiere la interacción entre una proteína quinasa, que en *S. cerevisiae* se denomina Cdc28, y un grupo de



Visión esquemática del ciclo celular de la levadura S. cerevisiae*, que se completa en un par de horas si el medio es rico en nutrientes. La longitud de las flechas no refleja la duración relativa de cada fase del ciclo. El esquema de la derecha describe la relación funcional existente entre las fosfatasas Sit4 y Ppz1*

proteínas denominadas ciclinas (Cln1, Cln2 y Cln3), que actúan como subunidades activadoras de la quinasa. Esta y las ciclinas corresponden a familias de proteínas que persisten a lo largo de la evolución. Son conservadoras.

Se han identificado numerosos genes de *S. cerevisiae* que intervienen en la transición de la fase G_1 a la fase S (transición G_1/S), el período crítico para la modulación del ciclo. Uno de ellos es *SIT4*, un gen que cifra una Ser/Thr proteína fosfatasa. Este tipo de enzimas son responsables de la desfosforilación de determinados residuos de fosfoserina y fosfotreonina.

La falta de la proteína Sit4 retrasa la transición G_1/S. Como resultado, estas células tienen un ciclo celular más prolongado y se duplican con mayor lentitud. Se ha observado que la falta de Sit4 limita la expresión de determinadas ciclinas (Cln1 y Cln2) y bloquea algún proceso necesario para la aparición de la gema.

Nuestro laboratorio identificó, tiempo atrás, otra proteína fosfatasa en levadura, la Ppz1, que guarda cierta relación estructural con Sit4. Dos observaciones posteriores nos permitieron implicar a Ppz1 en la regulación del ciclo celular. Por un lado, verificamos que el exceso de Ppz1 acarreaba un retraso substancial en el crecimiento de las levaduras. Por otro, descubrimos que la proteína inhibía la acción de Ppz1. La proteína Hal3 actuaba como si fuera una subunidad reguladora de la fosfatasa. Este último descubrimiento fue decisivo, pues se sabía que un exceso de Hal3 podía compensar buena parte de los defectos del ciclo celular provocados por la falta de Sit4. Así fue como concebimos la idea de que la fosfatasa Ppz1 constituía un elemento negativo en la transición G_1/S, es decir, actuaba como un agente bloqueante del ciclo.

Recientemente, y en colaboración con E. Garí y M. Aldea, del departamento de ciencias médicas básicas de la Universidad de Lérida, hemos confirmado nuestras hipótesis. En efecto, el exceso de Ppz1 dificulta la generación de la gema y retrasa el inicio de la síntesis de ADN. Por el contrario, la eliminación de Ppz1 compensa en buena medida los defectos derivados de la mutación de *SIT4*.

Inferimos, pues, que las fosfatasas Sit4 y Ppz1 ejercen funciones opuestas en cuanto a la regulación de la progresión G_1/S: la primera cumpliría un papel acelerador, la segunda sería un freno.

Cabía suponer que la eliminación de Sit4, unida a una hiperactivación de Ppz1, debería tener efectos devastadores para la célula. En efecto, la mutación conjunta de *SIT4* y *HAL3* presenta un fenotipo de letalidad sintética (se habla de letalidad sintética cuando la suma de dos mutaciones produce una célula inviable, mientras que cada mutación por separado no presenta un fenotipo tan drástico), ya que convergen dos sucesos contrarios al desarrollo correcto del ciclo: la ausencia de un efector positivo, Sit4, y la hiperactivación de un efector negativo (Ppz1), como consecuencia de la falta de su subunidad inhibidora (Hal3).

Si bien las líneas fundamentales que definen la ejecución del ciclo celular en eucariotas tiene un carácter prácticamente universal, queda claro que muchos aspectos importantes de los procesos de regulación pueden diferir en organismos distantes desde una perspectiva evolutiva.

¿Hasta qué punto es general este mecanismo descifrado en levaduras y en qué medida puede ayudarnos a comprender ciertos aspectos de la proliferación celular en animales superiores? En los últimos años se han descrito homólogos funcionales de Sit4 en insectos (*Drosophila*) y en mamíferos (humanos). Y aunque, de momento sólo se han encontrado en diversos hongos fosfatasas similares a Ppz1, parecen existir proteínas equivalentes a Hal3 en muy variados organismos, de las plantas al hombre. En consecuencia, no podemos descartar la existencia difundida de un mecanismo recíproco de aceleración/bloqueo del ciclo celular similar al descrito en las líneas precedentes.

JOAQUÍN ARIÑO y JOSEP CLOTET
Dpto. Bioquímica
y Biología Molecular,
Universidad Autónoma
de Barcelona

Naturaleza insólita

Mamífero tetraploide

Se trata de *Tympanoctomys barrerae*, rata vizcacha roja en román paladino, que presenta doble juego de cromosomas y doble cantidad de ADN por núcleo.

El animalillo parece una rata-canguro, con unas bulas timpánicas que son 30 % mayores que en cualquier roedor. Nuestro Octodóntido —cuyos molares dibujan un ocho— es endémico de Sudamérica. Habita en las dunas de los salares argentinos de Mendoza, donde construye galerías concéntricas de hasta tres niveles de profundidad y muchas salidas en diferentes direcciones.

Se alimenta de plantas con alto contenido salino. Mediante cerdas en el paladar, separa el contenido líquido que traga, a la inversa de las ballenas barbadas. Sobresale por su riñón eficaz. Su orina es la segunda más concentrada que se conoce en roedores de desierto y forma un ámbar oscuro al solidificarse.

Todos los ejemplares que hemos examinado tienen 102 cromosomas en sus células somáticas y un sistema de determinación del sexo *XY*, igual que los humanos. No se sabe de ningún otro mamífero con tan alto número cromosómico.

¿Sería acaso diploide (2*n*)? Nuestra sospecha se reforzó al conocer la asociación proteica entre *Tympanoctomys* y su pariente desertícola, *Octomys mimax* (56 cromosomas). Ante tal similitud genética cabía pensar en una duplicación genómica (poliploidía); pero tal fenómeno, habitual en los vegetales, se consideraba imposible en mamíferos.

La poliploidía se origina cuando fracasa la división de los cromosomas subsiguiente a la fecundación. Si eso ocurriese en humanos, habría personas con 92 cromosomas que producirían espermatozoides y óvulos con 46 cromosomas, en vez de los 23 habituales. Aunque se ignora el origen de este mecanismo en *Tympanoctomys*, el resultado es un organismo tetraploide (con cuatro juegos de cromosomas).



1. La rata vizcacha roja (Tympanoctomys barrerae) *tiene el mayor número de cromosomas (102) conocidos para un mamífero*



2. Salar de Arrollito (Mendoza, Argentina), ambiente típico donde se encuentra la rata vizcacha roja

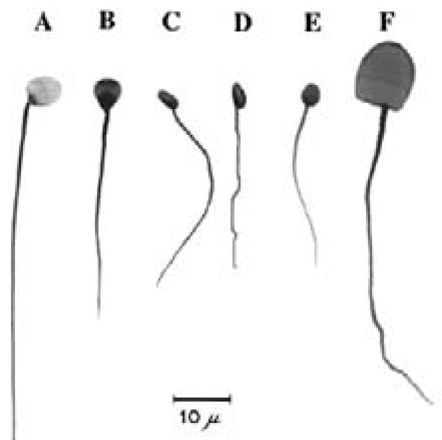
Para comprobar la existencia de tetraploidía se mide la cantidad de ADN total de las células somáticas y las germinales. Si un organismo es tetraploide, su contenido de ADN genómico doblará la cuantía observada en sus progenitores diploides; puede averiguarse por citometría de flujo, técnica que consiste en disgregar las células de un tejido (riñón, por ejemplo) y su tinción fluorescente.

Los resultados que obtuvimos en 149 individuos agrupados en 31 especies y 9 familias de roedores sudamericanos y africanos no dejaron lugar a dudas. *Tympanoctomys*, con 16,8 picogramos de ADN, dobla la cifra de sus progenitores; en general, su tamaño genómico duplica los 7 picogramos de ADN de los mamíferos, globalmente considerados. Añádase a ello que el número cromosómico total (2*n*) y el número de brazos cromosómicos (*FN*) es también el doble. Inferimos, pues, que la poliploidía constituía la explicación más plausible y directa.

Era de esperar, asimismo, que, con el incremento de la cantidad de ADN encerrada en el núcleo, aumentara el diámetro celular máximo. La verdad es que las células hepáticas de la rata vizcacha tienen un diámetro 20 % mayor que las de sus congéneres diploides. Y lo que reviste un interés superior, de la investigación comparada resultó que los espermatozoides de la rata vizcacha eran mucho mayores que los de cualquier otro roedor.

A la formación de un organismo tetraploide se llega por dos caminos: por autopoliploidía, si la duplicación genómica acontece dentro de una especie, y por alopoliploidía, si resulta de la hibridación de dos especies ancestrales. En ambos casos, la progenie se encuentra aislada, a efectos reproductores, de sus ancestros; dicho de otro modo, el apareamiento de un tetraploide con un diploide originaría triploides estériles.

La poliploidía ha desempeñado un papel decisivo en la evolución vegetal. Entre el 50 y el 70 % de las angiospermas surgieron así. Entre los vertebrados se conocen poliploides en peces, anfibios y reptiles. El éxito de las especies alopoliploides, con respecto a sus ancestros diploides,



3. Comparación de los espermatozoides de diversos roedores (A-E) y los de la rata vizcacha roja. A: Cavia porcellus *(conejillo de indias), B:* Galea musteloides *(cuy serrano), C:* Microcavia australis *(cuy de la Patagonia), D:* Dolichotis salinicola *(conejo de los palos), E:* Myocastor coypus *(coipo o nutria), F:* Tympanoctomys barrerae *(ratón vizcacha roja)*

radica en la mayor capacidad colonizadora de ambientes extremos y en la adaptación a la vida en entornos inestables. Ello se debe a que los dos genomas otorgan mayor probabilidad de contar con alelos diferentes (heterocigosis) y mayor tasa mutacional para generar nuevas variantes adaptativas.

Frente a la idea clásica que veía en las especies poliploides un callejón sin salida, la nueva tesis, apoyada en la comprensión botánica del fenómeno, pone énfasis en el papel preponderante de la poliploidía en la evolución de plantas y vertebrados. En efecto, se aportan genes redundantes que con el tiempo pueden cumplir funciones distintas y se establece un mecanismo para acelerar el cambio genómico.

Existen graves limitaciones para crear un linaje de mamíferos poliploides. De los progenitores se exige que tengan la misma dotación cromosómica para perpetuar el proceso. Si se origina un solo individuo tetraploide ($4n$), el apareamiento con sus congéneres diploides ($2n$) produce descendientes triploides ($3n$), que suelen presentar malformaciones letales y ser estériles. El proceso requeriría, por tanto, que el fenómeno se produjera en al menos dos hermanos de una camada, con posterior apareamiento consanguíneo para evitar los problemas mencionados.

Pero hay más factores limitantes. El mecanismo de determinación del sexo y de la compensación de la dosis de productos génicos en macho y hembra levanta otra barrera: los machos tienen sólo un cromosoma *X* y las hembras, dos. Para equiparar las dosis en ambos sexos, durante las primeras etapas del desarrollo se produce la inactivación al azar de uno de los cromosomas *X* de la hembra; pero no en el macho.

En el caso de una hembra tetraploide (con 4 cromosomas *X*) o de un macho (con dos *X* y dos *Y*) se generan, en principio, una serie de gametos inviables. En este sentido, resulta sintomático que la rata vizcacha no posea exactamente el doble número cromosómico que su ancestro más probable, *Octomys mimax*, que posee 56 cromosomas. Si se descarta que los ancestros portaran un número cromosómico diferente de 56, en la evolución de la rata vizcacha se habrían perdido 10 elementos. Hay indicios de que tal pudiera haber ocurrido, ya que los cromosomas organizadores del nucléolo no se encuentran en cuatro copias, sino en dos.

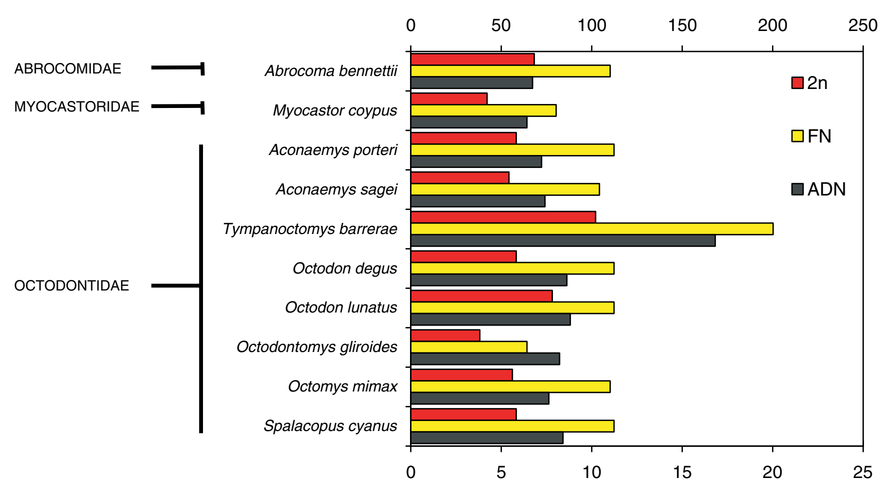
De igual modo, los cromosomas sexuales no están constituidos por cuatro elementos, sino por dos *X* en las hembras y *X* e *Y* en los machos. Se piensa que, como solución al problema de la compensación de dosis y determinación del sexo, se habrían eliminado estos y otros cromosomas, en razón de la incompatibilidad meiótica y conflictos en la expresión génica. De cualquier forma, la peculiaridad del fenómeno persiste.

Entre las líneas de investigación ulterior propuestas se confía en el marcaje fluorescente de los cromosomas mediante sondas específicas. Esta técnica permitirá identificar sin ambages el número de copias de un determinado gen y establecer molecularmente el número de cromosomas sexuales. El estudio genético de este mamífero tetraploide permitirá la comprensión cabal de la compensación de dosis y la normal determinación del sexo en los mamíferos.

El estudio del apareamiento meiótico de los cromosomas nos ofrecerá antecedentes valiosos acerca del origen de este tetraploide y de las soluciones citológicas que evitaron la producción desequilibrada de gametos. A este respecto, importa destacar que el adecuado control del desarrollo por modulación de la expresión génica resulta esencial para la viabilidad y supervivencia de los organismos. Recuérdese que un genoma inestable es característico de las células cancerosas.

Conviene resaltar, por fin, que un roedor con el doble de material genético sigue siendo un roedor. El control génico limita el tamaño; un genoma duplicado no significa que esta rata tenga un tamaño que duplique el de sus progenitores. En consecuencia, el estudio de la organización del genoma del roedor permitirá comprender cómo se modula la expresión fenotípica de distintos sistemas génicos en mamíferos. Por vez primera se podrán hacer comparaciones entre mamíferos diploides y uno tetraploide que, según datos de calibración molecular, ha existido por aproximadamente 7 millones de años.

MILTON H. GALLARDO
Instituto de Ecología y Evolución,
Universidad Austral de Chile



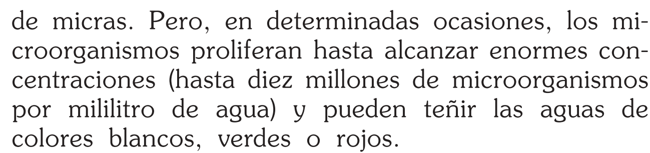
*4. Comparación del número cromosómico (2*n*), número de brazos cromosómicos (FN) y contenido de ADN entre la rata vizcacha roja* (Tympanoctomys barrerae) *y otros octodóntidos, abrocómidos y miocastóridos. El contenido de ADN se lee en la escala inferior del gráfico*

De cerca

Josep M. Gasol y Carlos Pedrós-Alió

Los colores del agua

El agua es transparente e incolora... Pero no siempre. Las aguas de nuestros ríos, lagos, embalses y mares pueden tener partículas inorgánicas en suspensión. Estas partículas tiñen el agua de color marrón (de las arcillas o de los ácidos húmicos) o gris (de los sedimentos glaciares). Más espectaculares incluso resultan las coloraciones de las aguas causadas por el crecimiento de determinados microorganismos. Porque lagos, lagunas y océanos están llenos de microorganismos, algas y bacterias, que forman la base de las redes tróficas planctónicas. Estos organismos no son perceptibles a simple vista. Su tamaño oscila entre una micra (una milésima parte de un milímetro) y unas pocas decenas



de micras. Pero, en determinadas ocasiones, los microorganismos proliferan hasta alcanzar enormes concentraciones (hasta diez millones de microorganismos por mililitro de agua) y pueden teñir las aguas de colores blancos, verdes o rojos.

Por ejemplo, desde un barco el agua suele verse de color azul-grisáceo, dependiendo de cómo se refleje la luz en la superficie. Pero algunas algas, como la cocolitoforal *Emiliania huxleyi* pueden darle un aspecto lechoso. Y el crecimiento masivo de algas dinoflageladas produce coloraciones verdes o rojizas (las llamadas "mareas rojas"). En las salinas, típicas de las regiones mediterráneas, el agua de mar se va concentrando hasta que se produce la cristalización de la sal. Estas lagunas de cristalización son de un intenso color rojizo debido a los pigmentos de algunas bacterias y arqueas de morfologías peculiares, como se observa en las fotografías al microscopio electrónico. Y, finalmente, en algunos lagos y lagunas situados en zonas cársticas se pueden dar proliferaciones de bacterias fotosintéticas o de algas que tiñen las aguas de colores verdosos, marrones o rojos. Un ejemplo extremo es el de la laguna Cisó, en la zona de Bañolas, que puede convertirse en un "lago de sangre".

El agua es transparente, sí... ¡pero sólo cuando los microorganismos se lo permiten!



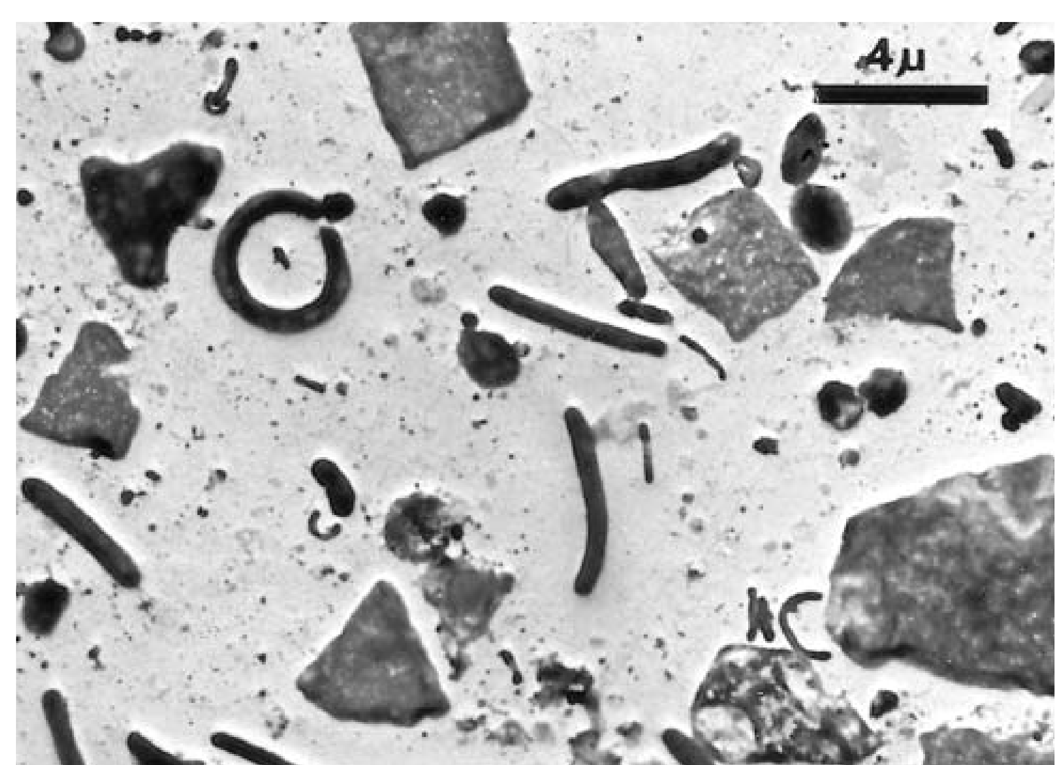
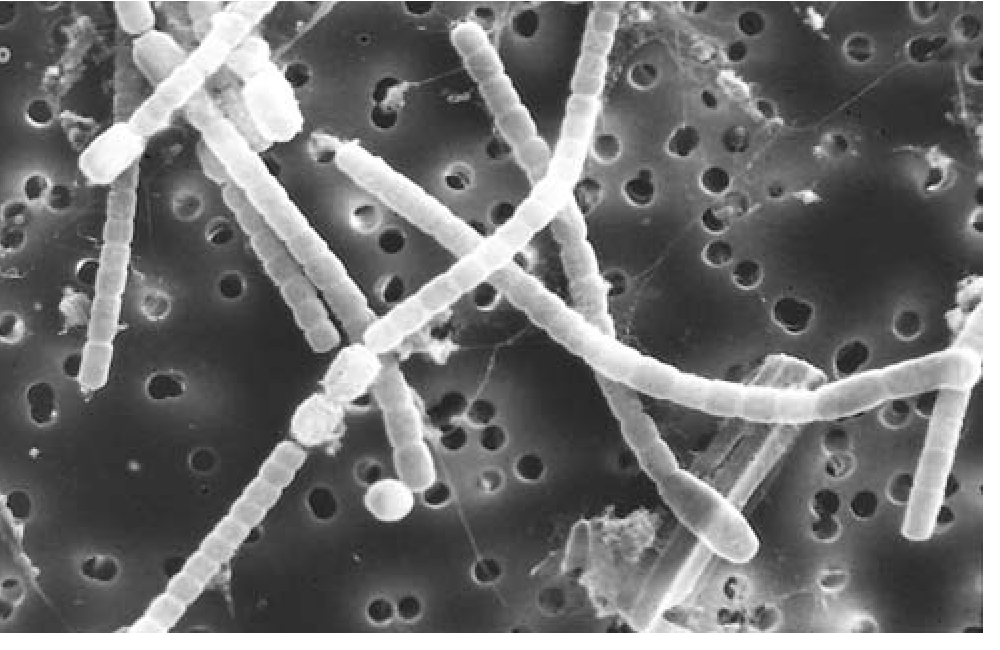
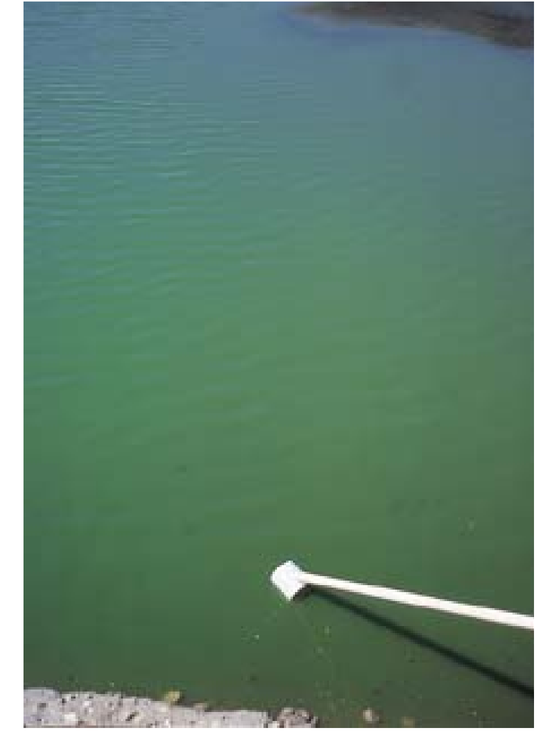


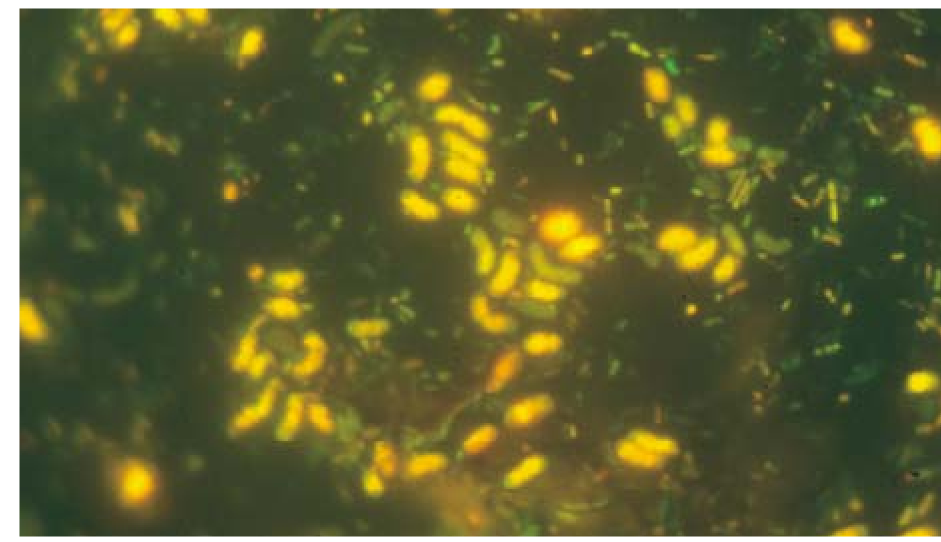
Imagen de un cristalizador en las salinas de Santa Pola (Alicante), de color rojo, generado por los pigmentos de las halobacterias y arqueas (fotografía: Carlos Pedrós-Alió). Algunos de estos microorganismos presentan morfologías curiosas como las que tienen "forma de sello" (fotografía al microscopio electrónico de transmisión de Núria Guixa-Boixereu)





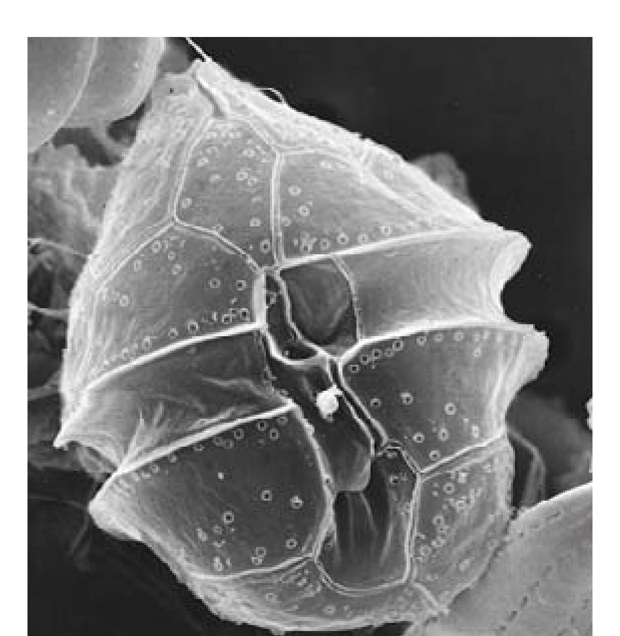
La cianobacteria Aphanizomenon flos-acquae *en una imagen de microscopía electrónica de barrido y tiñendo las aguas de un lago del estado de Wisconsin en los EE.UU. (Fotografías: Carlos Pedrós-Alió)*





La laguna Cisó, en Bañolas, con las aguas teñidas de color rojo (fotografía: Carlos Pedrós-Alió). El color se debe a la proliferación masiva de las bacterias fotosintéticas del género Chromatium *(fotografía de epifluorescencia de Emilio O. Casamayor)*

*Imagen de las aguas costeras del Mediterráneo en pleno desarrollo masivo de dinoflageladas (fotografía: Jordi Camp). Una imagen al microscopio electrónico de barrido de una de las dinoflageladas que típicamente causan coloraciones del agua de mar (*Pentapharsodinium tyrrhenicum*, fotografía de Magda Vila y José Manuel Fortuño)*





Síntesis por combustión

Las ondas de calor que se propagan por sí mismas pueden engendrar nuevos y mejores materiales. Empezamos ya a conocer los entresijos de las reacciones ultrarrápidas en ese proceso involucradas

Arvind Varma

Pensemos en un reguero de pólvora ardiendo. El fuego se propaga a través del mismo sin dejar nada a su paso, salvo ceniza y gases. Imaginemos ahora la ignición del extremo de un reguero diferente de polvo; ahora la brillante y resplandeciente onda de calor que irrumpe a través de la mezcla deja una masa solidificada a su paso. Este efecto de paradójica apariencia —el que la combustión no siempre consuma materiales o los destruya— es completamente real y constituye la esencia de una de las más prometedoras innovaciones en la ciencia de materiales: la síntesis por combustión.

Desde hace unos 30 años se conoce la síntesis por combustión. Por su medio se han creado ya más de 500 compuestos, muchos de los cuales han evidenciado su inapreciable valor en su aplicación a rodamientos a bolas, escudos de protección para seguridad nuclear, abrasivos, superconductores de alta temperatura y otros artículos de técnica depurada. Mas, a pesar de esta larga historia, el método de prueba y error ha venido siendo el principal medio de invención. Así, un químico podía llegar a saber finalmente que partiendo de polvos más finos obtenía un material sintético más resistente, pero sólo podía conjeturar sus causas. De ahí que las aplicaciones de la síntesis por combustión persistieran en un ámbito de especialización restringida. Hasta ayer mismo no empezó a desentrañarse el mecanismo real de propagación de una onda de calor a través de la mezcla original, dejando el material deseado en su estela. El conocimiento exacto de lo que sucede en las etapas comprendidas entre los componentes iniciales y el producto final constituye la condición obligada para refinar las técnicas de síntesis por combustión y aplicarlas.

Desde la prehistoria los seres humanos han venido empleando el fuego en su propio beneficio. Hace aproximadamente 13.000 años el hombre descubrió que, al hornear un trozo de arcilla maleable, ésta se transformaba en cerámica dura. Los técnicos de nuestros días han aprendido a quemar polvos especiales de arcilla en un horno para producir escudos cerámicos cuya potencia y resistencia al calor les permite proteger las naves espaciales. En ambos casos, el proceso aplica calor externo para romper los enlaces químicos del sustrato original y volverlos a ordenar en una nueva estructura.

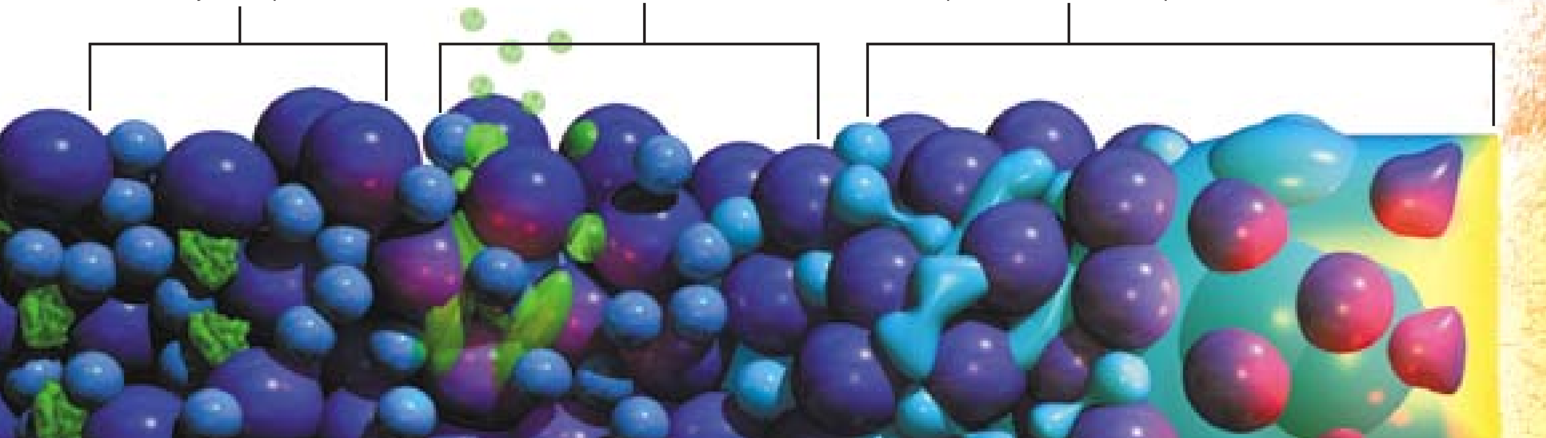
Cuando a finales del siglo XIX se observó que al deshacer los enlaces químicos se liberaba una cantidad notable de energía térmica, la ciencia comenzó a preguntarse por la posibilidad de un aprovechamiento directo de esta energía en la síntesis de materiales útiles. En 1972 ciertos químicos de la antigua Unión Soviética descubrieron cómo domeñar una parte suficiente de esta energía para impulsar una reacción de síntesis sin necesidad del calentamiento continuo de la mezcla. De ese modo, la síntesis por combustión no sólo forma un nuevo sólido a partir de componentes iniciales independientes, sino que también se autopropaga: una vez que se aplica calor para comenzar la reacción, ésta continúa por sí misma. Para prender una reacción de síntesis por combustión basta con un breve pulso de calor procedente de un filamento de tungsteno o un haz de láser, que utilizan mucha menos energía que los hornos industriales, el método habitual para fabricar materiales avanzados.

Las ventajas que presenta la síntesis por combustión sobre las técnicas clásicas de producción de materiales no se restringen al ahorro de energía. El consumo de energía y el tamaño de los hornos limitan el volumen

CALENTAMIENTO DE LA MEZCLA INICIAL
El contacto entre partículas de dos polvos iniciales (*esferas grandes y pequeñas*) es demasiado tenue para que se produzca una reacción química a bajas temperaturas.

VOLATILIZACION DE IMPUREZAS
El calentamiento expulsa impurezas de agua (*verde*), que se evapora cuando la temperatura de la mezcla inicial supera los cien grados Celsius.

FUSION Y DIFUSION DEL PRIMER REACTIVO
El polvo con inferior punto de fusión (*azul*) reviste a otras partículas. La intensificación del contacto entre los dos reactivos y las temperaturas superiores prenden la reacción química.

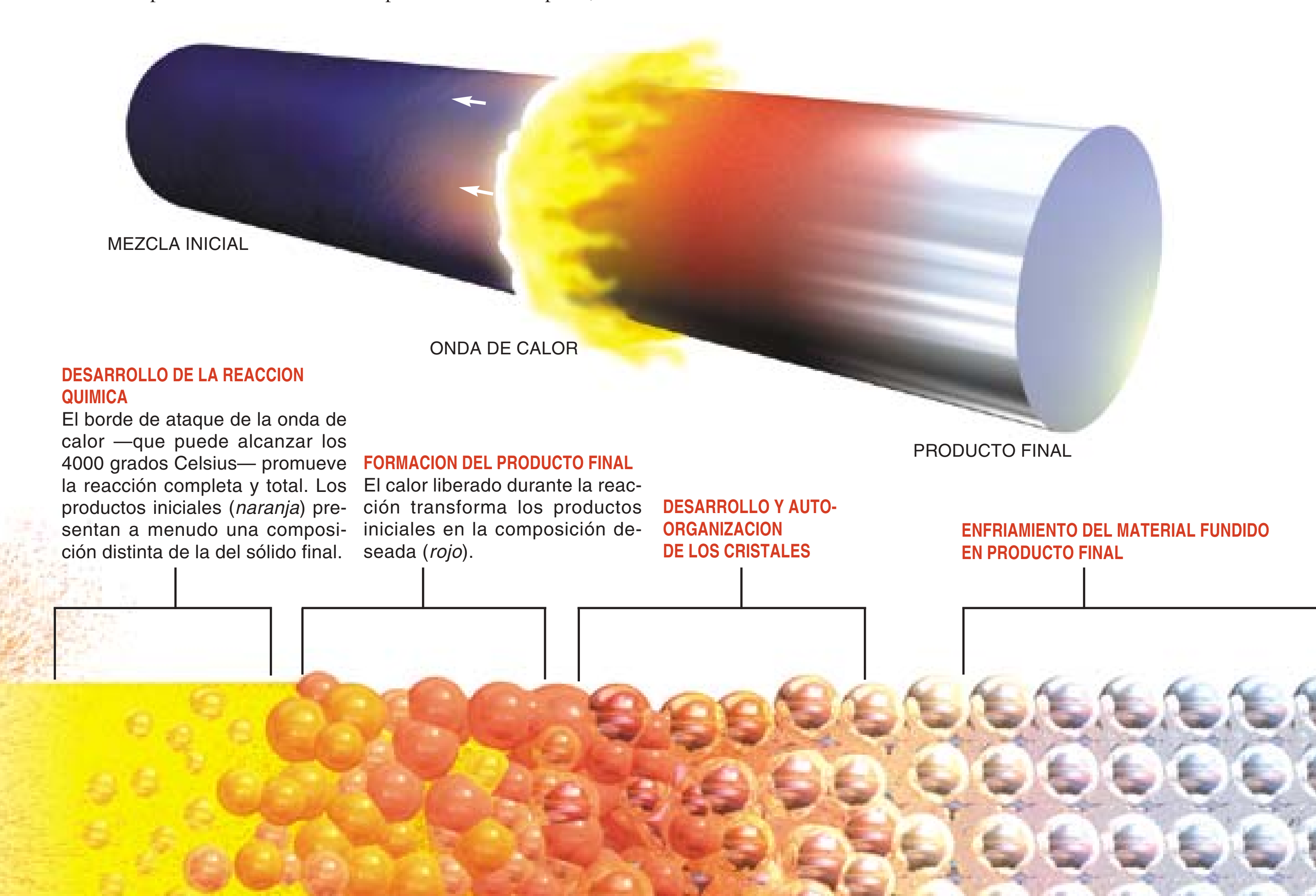


del material a convertir. Con la síntesis por combustión podemos obtener objetos de casi cualquier tamaño, porque el calor de la reacción química se engendra en todos los puntos del interior de la muestra original. Estas reacciones también alcanzan temperaturas entre 1500 y 4000 grados Celsius; además, el material se calienta a velocidades asombrosas, de hasta un millón de grados por segundo. De ello se desprende que la síntesis por combustión tarda escasos segundos en convertir una mezcla de reactivos en un nuevo sólido, frente a los minutos u horas que necesitan los hornos, que raramente alcanzan los 2000 grados Celsius, para realizar la misma tarea. El intenso y rápido calentamiento crea compuestos con estructuras microscópicas sumamente uniformes. Los hornos tradicionales, por contra, calientan el material irregularmente y pueden introducir defectos en la estructura del material, lo que no deja de constituir un problema potencialmente fatal para los objetos que experimenten una fortísima tensión mecánica. Una grieta microscópica en el revestimiento metálico de un avión, por ejemplo, puede desarrollarse hasta un tamaño capaz de romperlo, con consecuencias catastróficas.

En las reacciones de síntesis por combustión pueden intervenir los gases. Sin embargo, el método usual es el de llama sólida, donde todos los componentes iniciales y los productos resultantes permanecen en un estado sólido o líquido. Este tipo de reacción combina, por ejemplo, níquel y aluminio para producir los compuestos ligeros y resistentes al calor necesarios para las turbinas de los aviones y otras partes de los motores. Los polvos iniciales se comprimen en una pella, de forma cilíndrica por lo común. Para algunos fines, la pella entera se calienta uniformemente hasta que se produce la reacción simultánea a través de la muestra. En la mayoría de los casos, no obstante, la muestra se prende sólo en un punto y la onda de calor la atraviesa de un extremo a otro.

La síntesis por combustión es algo más que una forma rápida y, desde el punto de vista energético, rentable de fabricar materiales valiosos. Las altas temperaturas y los cortos tiempos de reacción pueden transformar un compuesto con rapidez suficiente para "engañar" a sus moléculas y solidificarse en estructuras que, en condiciones normales, serían inestables. Merced a esta capacidad podemos crear materiales exclusivos. Piénsese en cerámicas moteadas con diamantes sintéticos, una combinación ideal para las herramientas de corte de alta calidad. En los hornos de calentamiento lento, el diamante se vuelve grafito blando, pero durante la combustión rápida las partículas de diamante conservan su forma y dureza. La síntesis por combustión también puede producir materiales funcionalmente graduados, en los que compuestos y propiedades se distribuyen de acuerdo con lo deseado. La estructura microscópica del material puede tener una transición suave, por ejemplo, de un metal re-

LA ONDA DE CALOR se retropropaga irrumpiendo a lo largo de una barra de 10 centímetros de longitud de polvos comprimidos (*abajo*) en sólo unos pocos segundos. Se ha analizado minuciosamente el modo en que la onda de calor prende las reacciones químicas y transforma la estructura molecular dejando a su paso un nuevo sólido (*ampliación inferior*).



ARVIND VARMA ha estado investigando la síntesis por combustión de materiales avanzados durante los últimos diez años en la Universidad de Notre Dame.

sistente en un extremo a una cerámica resistente al calor en el otro. Con una variación gradual de la composición, en vez de bruscas fronteras entre compuestos, los materiales graduados resisten mejor los cambios drásticos de temperatura y tensión mecánica.

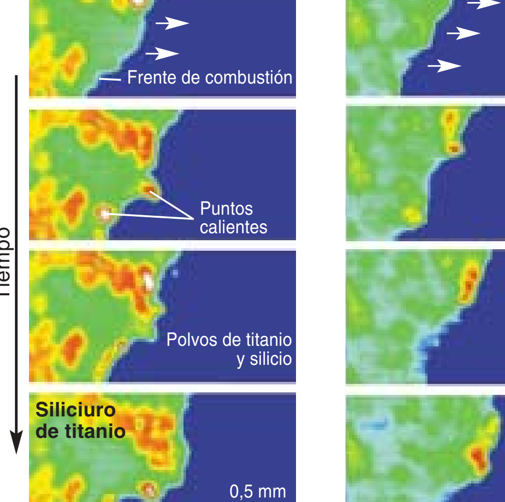
Aunque la síntesis por combustión ofrece numerosas ventajas sobre las técnicas al uso, habrá que superar ciertos obstáculos antes de su aplicación generalizada. El diseño a medida de los materiales necesita dominar en todos sus pormenores la mecánica de formación de la nueva estructura molecular, lo que significa poder seguir la pista de lo que sucede en cada fase de la reacción. Las características más atractivas de la síntesis por combustión —altas velocidades de calentamiento, altas temperaturas y cortos tiempos de reacción— dificultan también el estudio de la onda de reacción durante su propagación por la muestra. Para salir al paso de tamaño reto, está surgiendo un nuevo campo de investigación básica.

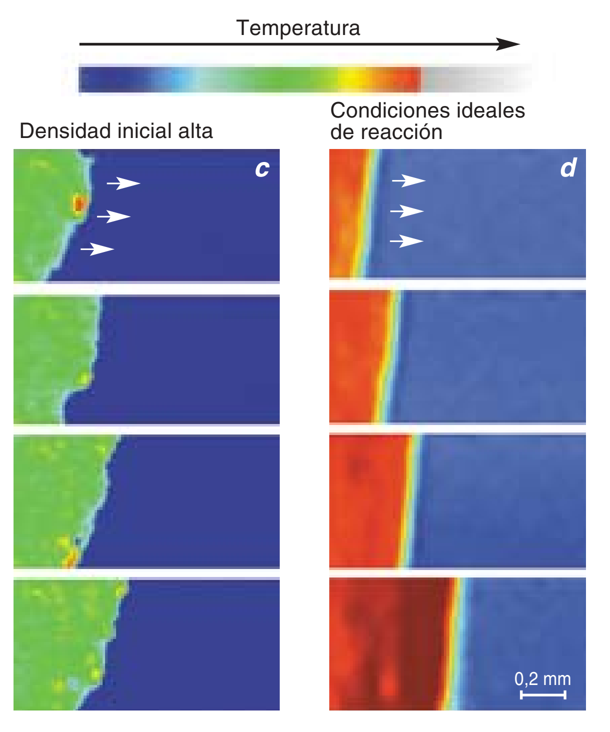
Los químicos comienzan a incorporar ideas procedentes de diversas áreas de la ciencia y la ingeniería en su investigación de esta clase de reacciones. De los biólogos que estudian el movimiento rápido de los músculos, han tomado prestada una técnica con la que pueden controlar exactamente cuándo se funden determinados componentes y se forman nuevos cristales durante la reacción. En este método de difracción de rayos X con resolución temporal, un dispositivo barre la muestra que reacciona con potente radiación de sincrotrón para generar diagramas de rayos X del material cada 0,01 segundos. A partir de estos diagramas, podemos determinar la composición de las fases químicas que aparecen en un momento dado de la reacción. Para identificar la evolución de la microestructura, se emplea una técnica desarrollada en su origen para estudiar la quema del combustible sólido de los cohetes. Dejando caer una muestra en combustión en un recipiente de argón líquido, podemos congelar la reacción antes de que todos los componentes de partida se transformen en el producto final. Luego, esta muestra enfriada se rebana en finas láminas y se analiza su microestructura mediante microscopía electrónica.

Cuando empezaron a observarse las reacciones de combustión con estos nuevos métodos, los químicos descubrieron que las características del material cambiaban a medida que la onda de reacción recorría diferentes zonas. Muchos laboratorios concentran ahora sus esfuerzos en comprender los fenómenos que ocurren cerca del borde de ataque de la onda de reacción, o frente de combustión, porque ahí se forman los compuestos primarios que definen la estructura y las propiedades del

Microscopía de vídeo de alta velocidad

Por una reacción mejor





ONDA CENTELLEANTE que caracteriza a muchas reacciones de síntesis por combustión, incluida la formación de siliciuro de titanio. Las cuatro imágenes de vídeo de alta velocidad nos muestran que el silicio se funde y rodea las partículas sólidas de titanio, dando inicio a una reacción (*rojo*). La onda de calor avanza sólo cuando aparecen estos "puntos calientes" (*a*). Esta temperatura variable en el borde de ataque de la reacción, o frente de combustión, constituye todo un problema, pues causa irregularidades en la microestructura del producto final. El iniciar una reacción en muestras de mayor densidad, que pueden disipar el calor con mayor eficiencia, disminuye la formación de los puntos calientes (*b* y *c*) y se obtiene una microestructura más uniforme. Los químicos buscan condiciones de reacción que generen una onda cuasihomogénea y que ésta se desplace uniformemente y muestre una variación pequeña de temperatura a lo largo del frente de combustión (*d*).

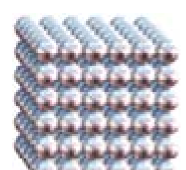
material final. La anchura de esta región varía de 0,05 a 0,5 milímetros, lo que basta para fijar sólo escasas decenas de partículas. Dentro de esa mínima región, varios procesos físicos y químicos trabajan conjuntamente en la transformación de la estructura molecular. Los investigadores necesitaban poder observar dicha zona.

Durante los últimos seis años, mi equipo de la Universidad de Notre Dame ha diseñado una herramienta especialmente útil para observar las condiciones microscópicas a lo largo del frente de combustión. Ya podemos ver de qué modo la onda de reacción atraviesa un material; nos valemos de una cámara digital de vídeo de alta velocidad que observa a través del microscopio y detecta incluso objetos de sólo 0,0015 milímetros de diámetro (1/50 del espesor de un cabello humano). Nuestra cámara capta hasta 12.000 imágenes por segundo, mientras que una cámara normal de vídeo capta sólo 30 imágenes por segundo. Con nuestra técnica, hemos descubierto que una reacción que ante nuestros ojos parece desarrollarse uniformemente procede de forma compleja e irregular a nivel microscópico.

Obtenida esta nueva información sobre la microestructura del material que se transforma, clasificamos las ondas de reacción en dos tipos generales: cuasihomogéneas y centelleantes. Una onda cuasihomogénea procede uniformemente; la temperatura no experimenta cambios notables a lo largo del frente de combustión. Ambas condiciones son ideales para fabricar un material con una estructura uniforme. El frente de combustión de una onda centelleante, por contra, presenta una variación extrema de temperatura, lo que puede producir defectos en el sólido final. Ocurre esta pauta en sistemas donde al menos un reactivo se funde durante la reacción. Las partículas del reactivo con inferior punto de fusión comienzan a fundirse justo delante del frente de combustión, y la onda de reacción avanza sólo cuando aparecen “puntos calientes”.

A tan pormenorizada caracterización de ondas llegamos hace apenas un par de años. El conocimiento de estos detalles nos permite diseñar las propiedades exactas del compuesto final. En las reacciones que se desplazan como ondas centelleantes, podemos controlar la aparición de puntos calientes mediante la cuidadosa selección de las condiciones experimentales. Las reacciones entre titanio y silicio, por ejemplo, producen menos puntos calientes —y, por tanto, hay una menor variación de temperatura a lo largo del frente de combustión— cuando aumentamos la densidad de la pella de polvos iniciales.

Las nuevas formas de analizar las reacciones de combustión han abierto la puerta a una creación más rentable de nuevos materiales. Lo comprobamos en la mejora de las aleaciones basadas en cobalto, de uso frecuente en implantes ortopédicos (caderas y rodillas artificiales). Durante décadas, la técnica de implantes implicaba la fusión de lingotes de las aleaciones en hornos y su vertido en moldes apropiados. Mis colegas y yo estamos trabajando tanto en la fabricación de aleaciones más resistentes como en la eliminación de etapas de fabricación en pro de la síntesis directa del implante en su molde.



Síntesis de combustión

¿Para qué es apropiada?

COMPOSICION	APLICACIONES
CARBUROS Carbono más titanio o silicio (TiC, SiC)	Abrasivos, herramientas de corte, refuerzos cerámicos
BORUROS Boro más titanio o lantano (TiB_2, LaB_6)	Abrasivos, herramientas de corte, cátodos
SILICIUROS Silicio más titanio o molibdeno ($TiSi_2$, $MoSi_2$)	Elementos de calefacción, conectores eléctricos, barreras Schottky para electrónica
ALUMINIUROS Y TITANITAS Aluminio o titanio más níquel (AlNi, TiNi)	Materiales de turbinas y aeroespaciales, aleaciones con memoria de forma
NITRUROS Nitrógeno más niobio o silicio (NbN, Si_3N_4)	Piezas de motores cerámicos, rodamientos a bolas, escudos de protección para seguridad nuclear
HIDRUROS Hidrógeno más uno o varios metales (MgH_2, $ZrNiH_3$)	Almacenamiento de hidrógeno, materiales catalíticos
OXIDOS Oxígeno más uno o varios metales ($YBa_2Cu_3O_7$-x, $La_{0,8}Sr_{0,2}CrO_3$)	Superconductores de alta temperatura, sensores de gas, células de combustible
CALCOGENUROS Y FOSFUROS Azufre o fósforo más molibdeno o galio	Lubricantes de alta temperatura, semiconductores

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMBUSTION SYNTHESIS OF ADVANCED MATERIALS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS. A. Varma, A. S. Rogachev, A. S. Mukasyan y S. Hwang en *Advances in Chemical Engineering*, vol. 24, págs. 79-226; 1998.

COMPLEX BEHAVIOR OF SELF-PROPAGATING REACTION WAVES IN HETEROGENEOUS MEDIA. A. Varma, A. S. Rogachev, A. S. Mukasyan y S. Hwang en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n.º 19, págs. 11053-11058; 1998.

Nuevas dimensiones para otros universos

El universo visible podría extenderse en una membrana flotante por un espacio con dimensiones supernumerarias. Estas unificarían las fuerzas de la naturaleza y podrían contener universos paralelos

Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali

Edwin A. Abbott contaba en *Planilandia: Una historia en muchas dimensiones*, de 1884, las aventuras de "A. Cuadrado", que vivía en un mundo bidimensional poblado de triángulos, cuadrados, pentágonos y demás figuras geométricas animadas. Hacia el final del relato, el primer día del año 2000, una criatura esférica de la tridimensional "Espaciolandia" atraviesa Planilandia y saca a Cuadrado de su dominio planar y le enseña la verdadera naturaleza tridimensional de un mundo mayor. Cuando consigue entender lo que la esfera le está mostrando, Cuadrado conjetura que quizás Espaciolandia sea a su vez un pequeño subespacio de un universo tetradimensional aún mayor.

Los físicos llevan ya dos años examinando en serio una idea muy parecida: que todo lo que vemos en nuestro universo está encerrado en una "membrana" tridimensional tendida en un dominio dotado de más dimensiones. Pero al revés que Cuadrado, que comprendió gracias a una intervención divina procedente de Espaciolandia, es posible que los físicos estén pronto en condiciones de detectar y verificar la existencia de dimensiones supernumerarias de la realidad que podrían medir hasta un milímetro. Ya se están preparando experimentos que buscan los efectos de tales dimensiones adicionales en la fuerza de la gravedad. Si la teoría es correcta, los experimentos con partículas de altas energías que pronto se realizarán en Europa verán procesos insólitos relacionados con la gravedad cuántica; por ejemplo, la creación de microagujeros negros transitorios. La teoría no es una historia fantástica; se basa en avances recientes de la teoría de cuerdas y resolvería ciertos problemas que aquejan a la física de partículas y a la cosmología desde hace mucho.

Ideas tan fuera de lo común como la teoría de cuerdas y la multidimensionalidad nacen del afán por conocer la fuerza de la gravedad. Más de tres siglos después de que Isaac Newton propusiera su ley de la gravitación, la física sigue sin explicar por qué es la gravedad muchísimo más débil que las otras fuerzas; de una levedad, efectivamente, enorme. Basta un pequeño imán para levantar del suelo un clavo y vencer así la atracción gravitatoria de la masa entera de la Tierra. La atracción gravitatoria entre dos electrones es 10^{43} veces más débil que su mutua repulsión eléctrica. La gravedad nos parece importante —nos asienta los pies en el suelo y pone a la Tierra a dar vueltas alrededor del Sol— sólo porque esas grandes agregaciones de materia son eléctricamente neutras; las fuerzas eléctricas son tan pequeñas, que pueden despreciarse y la gravedad queda, con ser tan débil, como la única fuerza perceptible.

La levedad inexplicable de la gravedad

La masa de los electrones tendría que ser 10^{22} veces mayor para que las fuerzas eléctricas y gravitatorias entre dos de ellos fuesen iguales. La producción de una partícula tan pesada requeriría 10^{19} gigaelectronvolt (GeV) de energía, la llamada energía de Planck. Una magnitud asociada a ésta es la longitud de Planck, 10^{-35} metros. Por mor de comparación, el núcleo de un átomo de hidrógeno, un protón, es unas 10^{19} veces mayor y tiene una masa de alrededor de 1 GeV. Ni siquiera el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cuando entre en funcionamiento dentro de cinco años, escudriñará distancias de menos de alrededor de 10^{-19} metros. Ya que la gravedad llega a ser tan intensa como el electromagnetismo y las otras fuerzas a la escala de Planck, se ha dado tradicionalmente por sentado que la teoría que unifique la gravedad con las demás interacciones se manifestará sólo a esas energías. En tal caso la natura-

NIMA ARKANI-HAMED, SAVAS DIMOPOULOS y GEORGI DVALI concibieron la teoría de las dimensiones supernumerarias en febrero de 1998, cuando coincidieron en la Universidad de Stanford. Arkani-Hamed se formó en la Universidad de California en Berkeley, donde hoy enseña. Dimopoulos, ateniense, se doctoró en la Universidad de Chicago y es catedrático de física de Stanford. En 1981 propuso con Howard Georgi, de Harvard, el modelo estándar supersimétrico. Dvali se especializó en física de altas energías y cosmología en la Universidad georgiana de Tbilisi. Desde 1998 da clases en la de Nueva York.



1. UN UNIVERSO MEMBRANA en un ámbito de más dimensiones: ahí puede que estemos viviendo. Los experimentos podrían detectar señales de dimensiones supernumerarias “grandes”, de hasta un milímetro, este año.

leza de la teoría unificada final estaría en el futuro previsible, y más allá de toda esperanza, fuera del alcance de la investigación experimental directa.

Los aceleradores más potentes en funcionamiento sondean las energías entre 100 y 1000 GeV (un teraelectronvolt, o Tev). Se ha visto que la fuerza electromagnética y la interacción débil (fuerza ejercida entre partículas elementales, a la que se deben ciertos tipos de desintegración radiactiva) se unifican en ese intervalo. Entenderíamos por qué es la gravedad tan débil si desentrañásemos el factor de 10^{16} que separa la escala electrodébil de la escala de Planck.

Para nuestro infortunio, la teoría de la física de las partículas elementales, el modelo estándar, que tan extraordinarios éxitos ha tenido, no puede explicar el tamaño de ese salto inmenso, porque está ajustada meticulosamente para concordar con la escala electrodébil observada. La buena noticia es que ese ajuste (con otros 16) vale de una vez por todas para cubrir miríadas de observaciones. La mala es que hemos de sintonizar finamente la teoría básica con una precisión de alrededor de una parte en 10^{32}; si no, los efectos cuánticos —inestabilidades— arrastrarían la escala electrodébil sin parar hasta la escala de Planck. Que en la teoría haya un equilibrio tan delicado es como entrar en una habitación y encontrar un lápiz que se mantiene vertical sobre su punta en una mesa. No es imposible, pero sí muy inestable, y nos preguntaríamos cómo lo ha logrado.

Los teóricos atacan este problema, lo llaman el problema de la jerarquía, desde hace veinte años alterando la naturaleza de la física de partículas cerca de los 10^{-19} metros (o 1 TeV), de suerte que se estabilice la escala electrodébil. La modificación más popular del modelo estándar que consigue tal objetivo se basa en una nueva simetría, la supersimetría, que, volviendo a la metáfora del lápiz, es como un hilo invisible que lo sujetase e impidiese que cayera. Los aceleradores no han ofrecido todavía ninguna prueba directa de la supersimetría, pero ciertos indicios indirectos respaldan la ampliación supersimétrica del modelo estándar. Por ejemplo, cuando las intensidades medidas de las interacciones fuerte, débil y gravitatoria se extrapolan teóricamente a distancias más cortas, se cortan con mucha exactitud en un valor común, siempre y cuando la extrapolación se atenga a reglas supersimétricas. De lo que se desprende que se produce una unificación supersimétrica de esas tres fuerzas a unos 10^{-32} metros; aunque es alrededor de mil veces mayor que la longitud de Planck, sigue estando muy alejada del alcance de los colisionadores de partículas.

La gravedad y las dimensiones espaciales grandes

Durante veinte años, no hubo otra manera viable de abordar el problema de la jerarquía que la de cambiar la física de partículas cerca de los 10^{-19} metros mediante la introducción de procesos nuevos, como la supersimetría. Pero en el último bienio se ha propuesto un enfoque radicalmente diferente, que modifica el espacio-tiempo, la gravedad y la propia escala de Planck. La idea clave reside en el extraordinario tamaño de la escala de Planck; aceptado durante un siglo desde que lo propusiese el físico germano, se basa en un supuesto sobre la acción de la gravedad a cortas distancias que no está comprobado.

La ley gravitatoria newtoniana del inverso del cuadrado de la distancia —que dice que la fuerza entre dos masas decae con el cuadrado de la distancia que los separa— funciona extraordinariamente bien a distancias macroscópicas y explica la órbita de la Tierra alrede-

dor del Sol, la de la Luna alrededor de la Tierra, etcétera. Pero como la gravedad es tan débil, la ley se ha comprobado experimentalmente sólo hasta distancias de alrededor de un milímetro, y hemos de extrapolar a través de 32 órdenes de magnitud para concluir que la gravedad se torna intensa a la escala de Planck de 10^{-35} metros.

La ley del inverso del cuadrado es natural en un espacio tridimensional. Imaginemos unas líneas de fuerza gravitatoria que emanan uniformemente de la Tierra. A una mayor distancia de ésta se dispersarán sobre una capa esférica de mayor área. El área crece con el cuadrado de la distancia y la fuerza, pues, se diluirá en ese mismo grado. Supongamos que hubiese una dimensión más, que el espacio fuese tetradimensional. Las líneas de campo que emanasen de un punto se dispersarían entonces por una corteza tetradimensional, cuya superficie aumentaría con el cubo de la distancia; la gravedad seguiría una ley del inverso del cubo.

La ley del inverso del cubo no describe nuestro universo, pero imagínese ahora que la dimensión adicional se dobla y dibuja una pequeña circunferencia de radio R y que estamos mirando las líneas de campo que salen de una diminuta masa puntual. Cuando las líneas de campo están mucho más cerca de la masa que la distancia R, podrán dispersarse uniformemente por las cuatro dimensiones y la fuerza de la gravedad caerá con el inverso del cubo de la distancia. Pero una vez que las líneas se hayan extendido por la circunferencia entera, sólo les quedarán tres dimensiones por donde seguir dispersándose; en consecuencia, para distancias mucho mayores que R la fuerza variará con el inverso del cuadrado de la distancia.

El mismo efecto se produce cuando hay muchas dimensiones adicionales, todas dobladas hasta convertirse en circunferencias de radio R. Para n dimensiones espaciales supernumerarias, a distancias menores que R la fuerza de la gravedad seguirá una ley de la inversa de $2 + n$. Como no hemos medido la gravedad a distancias menores de un milímetro, quizás estemos pasando por alto los cambios que le causen a la gravedad dimensiones adicionales con un tamaño R de menos de un milímetro. Además, la ley del inverso de $2 + n$ haría que la gravedad alcanzase la "intensidad de la escala de Planck" muy por encima de los 10^{-35} metros. Es decir, la longitud de Planck (distancia a la que la gravedad se vuelve fuerte) no sería tan pequeña y se reduciría el problema de la jerarquía.

VOCABULARIO BASICO

Dimensiones. Distinguimos en nuestro universo cuatro dimensiones: tres espaciales (arriba y abajo, izquierda y derecha, adelante y atrás) y una temporal. Aunque nos cuesta imaginar dimensiones ulteriores, matemáticos y físicos llevan años analizando las propiedades de espacios teóricos dotados de cualquier número de dimensiones.

Tamaño de las dimensiones. Las cuatro dimensiones espacio-temporales conocidas se caracterizan por su inmensidad. La temporal arranca, al menos, desde hace 13.000 millones de años y podría prolongarse en un futuro sin fin. Las tres dimensiones espaciales pueden ser infinitas (nuestros telescopios han detectado objetos que están a más de 12.000 millones de años-luz) o finitas (las dos de la superficie terrestre se extienden sólo unos 40.000 kilómetros, la longitud de un meridiano).

Dimensiones adicionales pequeñas. Algunas teorías físicas introducen dimensiones reales supernumerarias enrolladas en circunferencias tan pequeñas (quizá 10^{-35} metros de radio) que no las detectamos. Piénsese en una hebra de algodón, que, en buena aproximación, es unidimensional. Basta un solo número para especificar dónde está una hormiga en la hebra. Pero con un microscopio veremos ácaros moviéndose por la superficie bidimensional de la misma: a lo largo de la extensa dimensión de la longitud y alrededor de la corta dimensión de la circunferencia.

Dimensiones adicionales grandes. Podría haber dimensiones "grandes", hasta de un milímetro, sin que dejasen de sernos invisibles. Ningún dato experimental conocido contradice esa hipótesis, capaz de explicar varios misterios de la física de partículas y de la cosmología. Todo lo que contiene el universo tridimensional que habitamos, con la excepción de la gravedad, estaría adherido a una "membrana", como bolas de billar que se mueven en el tapete verde y bidimensional de una mesa.

Dimensiones y gravedad. El comportamiento de la gravedad —en particular su intensidad— guarda íntima relación con el número de dimensiones en que actúe. El estudio de la acción de la gravedad en distancias de menos de un milímetro podría descubrirnos dimensiones supernumerarias grandes. Están en marcha experimentos de esa índole. Dichas dimensiones aumentarían además la producción de peculiares objetos propios de la gravedad cuántica, como los microagujeros negros, la partícula gravitón y las supercuerdas; todos ellos podrían detectarse en los aceleradores de partículas de altas energías antes de que transcurran diez años.

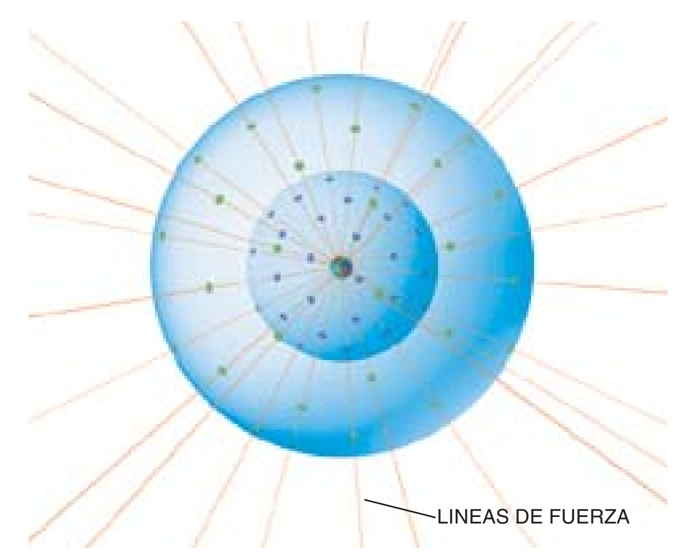
—Graham P. Collins, de la redacción.



PODEMOS ASOCIAR las bolas de una mesa de billar al comportamiento de las partículas elementales en la membrana que quizá sea nuestro universo. Los choques entre bolas radian energía en las tres dimensiones en forma de ondas sonoras (*rojo*), el equivalente de los gravitones de la comparación. El estudio preciso de los movimientos de las bolas detectaría la energía "que falta" y, por tanto, las dimensiones superiores.

Puede resolverse el problema de la jerarquía por completo si admitimos la existencia de dimensiones ulteriores en número suficiente para acercar la escala de Planck a la electrodébil. La unificación final de la gravedad con las demás fuerzas tendría lugar entonces cerca de los 10^{-19} metros y no, como se ha venido suponiendo, a los 10^{-35} metros. Cuántas dimensiones harían falta dependería de su magnitud. Recíprocamente, dado un número de dimensiones adicionales, podemos calcular qué tamaño deberían tener para que la gravedad se tornara intensa alrededor de los 10^{-19} metros. Si hubiese sólo una dimensión más, su radio R vendría a ser del orden de la distancia entre la Tierra y el Sol. La observación, pues, ya excluye esta posibilidad. Dos dimensiones supernumerarias, en cambio, resolverían el problema de la jerarquía si midiesen alrededor de un milímetro, precisamente donde acaba nuestro conocimiento directo de la gravedad. Si hubiese más dimensiones serían aún menores; si fuesen siete, necesitaríamos que midiesen unos 10^{-14} metros, el tamaño, aproximadamente, de un núcleo de uranio. Para los patrones de medidas actuales se trata de un tamaño muy pequeño, pero enorme según la vara de medir de la física de partículas.

Admitir la existencia de dimensiones supernumerarias puede parecer extravagante y un recurso *ad hoc*. Para los físicos constituye, sin embargo, una idea muy conocida; se remonta a los años veinte, cuando Theodor Kaluza y Oskar Klein crearon una notable teoría unificada de la gravedad y el electromagnetismo que requería una dimensión adicional. Las modernas teorías de cuerdas, que necesitan para tener coherencia matemática interna 10 dimensiones espaciales, le insuflaron nueva vida. En el pasado se dio por sentado que las dimensiones supernumerarias se doblaban y dibujaban circunferencias minúsculas de un tamaño parecido a la tradicional longitud de Planck de 10^{-35} metros, lo que las hacía indetectables y dejaba, además, sin resolver el problema de la jerarquía. Por contra, en la nueva teoría de que estamos hablando las dimensiones supernumerarias se enrollan formando circunferencias de al menos 10^{-14} metros de radio, y quizás tan inmensas como un milímetro.



2. LAS LINEAS DE FUERZA GRAVITATORIAS se extienden desde la Tierra en tres dimensiones. Conforme se abre la distancia desde el planeta, la fuerza se diluye al dispersarse por una superficie mayor (*esferas*). El área de cada esfera aumenta con el cuadrado de su radio; por tanto, en tres dimensiones la gravedad cae como el inverso del cuadrado de la distancia.

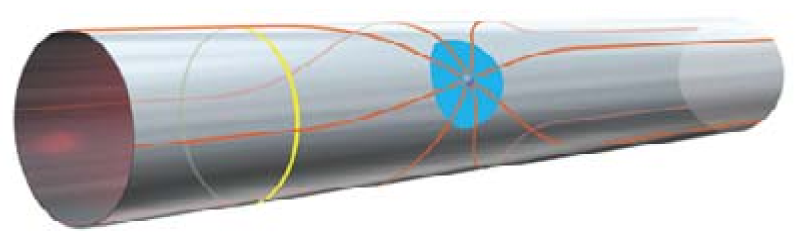
Nuestro universo en una pared

Si esas dimensiones son tan grandes, ¿por qué no las hemos percibido todavía? A simple vista distinguiríamos unas dimensiones supernumerarias de un milímetro, no digamos con un microscopio. Y aunque no hemos medido la gravedad por debajo del milímetro, disponemos de abundantes resultados experimentales de las otras fuerzas a distancias mucho menores, cerca de los 10^{-19} metros, compatibles todos ellos sólo con un espacio de tres dimensiones. ¿Cómo podría haber dimensiones supernumerarias grandes?

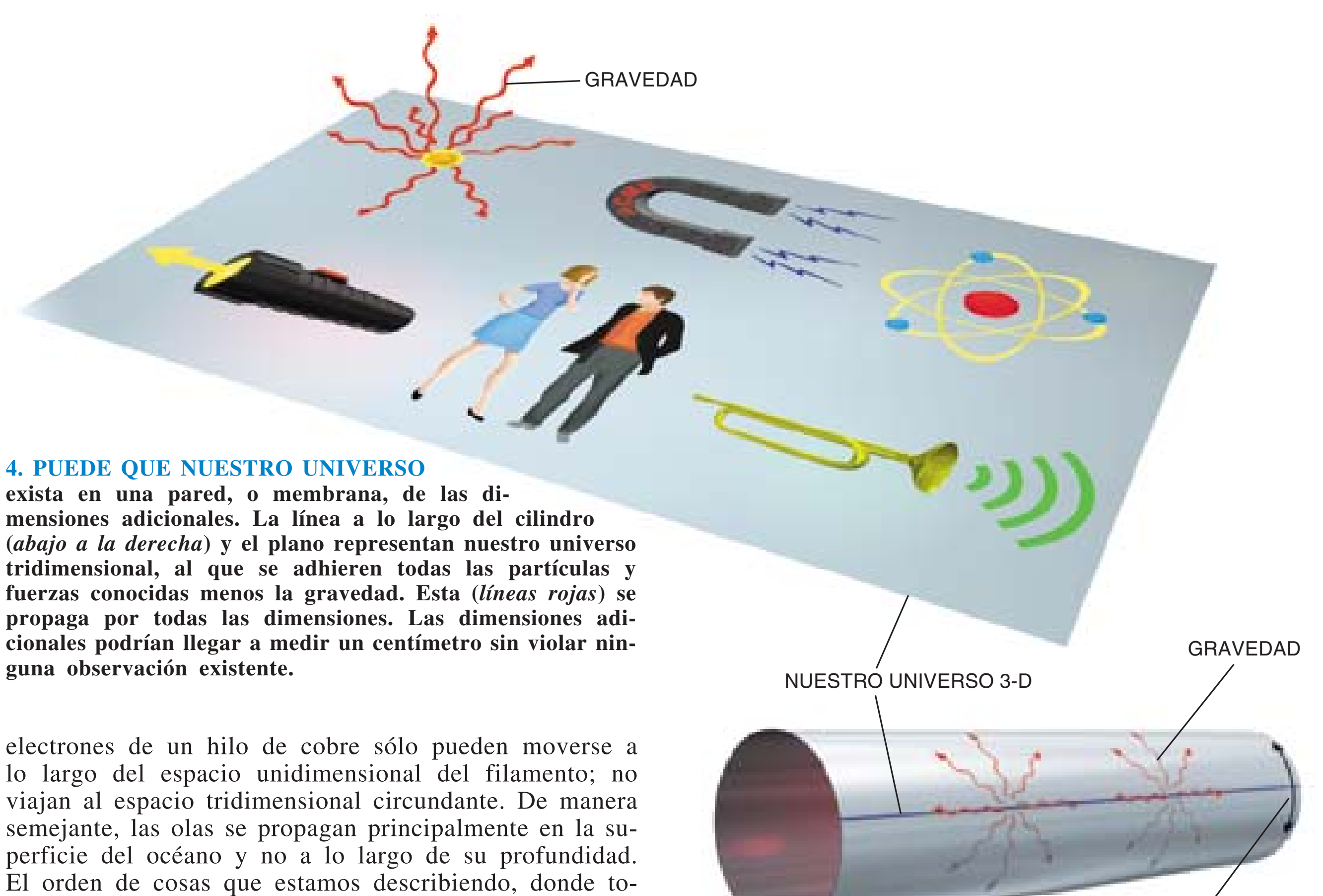
La respuesta es a la vez simple y peculiar: toda la materia y todas las fuerzas que conocemos —excluida la gravedad— están adheridas a una "pared" del espacio de las dimensiones adicionales. En éstas no pueden moverse los electrones, protones, fotones y demás partículas del modelo estándar; las líneas de campo eléctricas y magnéticas no pueden extenderse hasta un espacio de ulteriores dimensiones. La pared tiene sólo tres dimensiones, y por lo que se refiere a dichas partículas, el universo bien podría ser tridimensional. Sólo las líneas de campo gravitatorias pueden extenderse hasta un espacio de dimensiones superiores y sólo la partícula que transmite la gravedad, el gravitón, viaja libremente a ellas. La presencia de las dimensiones adicionales puede percibirse exclusivamente por medio de la gravedad.

Recurramos a una metáfora. Imaginemos que todas las partículas del modelo estándar (electrones, protones y demás) son bolas que se mueven sobre la superficie de una mesa de billar. En lo que a ellas se refiere, el universo es bidimensional. No obstante, los habitantes de la mesa, hechos de "bolas de billar", podrían detectar el mundo de más dimensiones: cuando dos bolas chocan con suficiente fuerza producen ondas sonoras que viajan en las tres dimensiones y roban algo de energía de la superficie de la mesa. Las ondas sonoras serían los gravitones, que pueden viajar por todo el espacio de más dimensiones. En las colisiones de partículas de altas energías esperamos observar una pérdida de energía debida al escape de los gravitones hacia dimensiones superiores.

Puede parecernos extraño que algunas partículas estén confinadas en una pared. La verdad es que se trata de un fenómeno harto común. Por botón de muestra, los



3. UNA DIMENSION ADICIONAL PEQUEÑA enrollada en una circunferencia (*la del tubo*) modifica la manera en que se dispersa la gravedad (*líneas rojas*) por el espacio. A distancias menores que el radio del círculo (*mancha azul*), las líneas de fuerza se separan deprisa en todas las dimensiones. A distancias mayores (*círculo amarillo*), las líneas han llenado la dimensión supernumeraria y ya no sienten su efecto.



4. PUEDE QUE NUESTRO UNIVERSO exista en una pared, o membrana, de las dimensiones adicionales. La línea a lo largo del cilindro (*abajo a la derecha*) y el plano representan nuestro universo tridimensional, al que se adhieren todas las partículas y fuerzas conocidas menos la gravedad. Esta (*líneas rojas*) se propaga por todas las dimensiones. Las dimensiones adicionales podrían llegar a medir un centímetro sin violar ninguna observación existente.

electrones de un hilo de cobre sólo pueden moverse a lo largo del espacio unidimensional del filamento; no viajan al espacio tridimensional circundante. De manera semejante, las olas se propagan principalmente en la superficie del océano y no a lo largo de su profundidad. El orden de cosas que estamos describiendo, donde todas las partículas, menos la gravedad, se adhieren a una pared, se genera de forma natural en la teoría de cuerdas. En realidad, uno de los grandes hallazgos que han promovido los recientes avances de la teoría de cuerdas ha sido caer en la cuenta de que la teoría contiene "paredes" así, llamadas D-branas, donde "brana" viene de "membrana" y "D", que indica una propiedad matemática de las branas, de "Dirichlet". Las D-branas gozan de las características requeridas: las partículas del estilo de los fotones o los electrones están representadas por diminutas longitudes de cuerda con dos cabos que han de estar adheridos a una D-brana. Los gravitones, por contra, constituyen bucles minúsculos de cuerda que pueden vagar en todas las dimensiones porque carecen de extremos que los anclen en una D-brana.

¿Vive?

Los teóricos de raza acostumbran, cuando aparece una teoría nueva, rodearla y darle caza. O lo que es lo mismo, descubrirle alguna contradicción con los resultados experimentales conocidos. La teoría de las dimensiones adicionales grandes cambia la gravedad a distancias macroscópicas y altera otras partes de la física de altas energías. Una pieza fácil de abatir. Mas, pese a que se aparta radicalmente de la visión usual del universo, no contradice ningún resultado experimental conocido. Unos cuantos ejemplos del tipo de pruebas que supera muestra cuán sorprendente es tal conclusión.

De entrada, podría preocupar que la modificación de la gravedad afectase a los objetos que esa fuerza mantiene unidos, las estrellas, las galaxias. Pero no les afecta. La gravedad cambia sólo a distancias menores de un milímetro, mientras que en una estrella, por ejemplo, actúa a través de miles de kilómetros para mantener juntas zonas remotas suyas. En un marco más general, aun cuando las dimensiones supernumerarias intensificasen la gravedad mucho más deprisa de lo usual a cortas distancias, alcanzaría a las otras fuerzas sólo cerca de los 10^{-19} metros y seguiría siendo muy débil en comparación con ellas a distancias mayores.

Una inquietud mucho más grave es la que se refiere a los gravitones, las partículas hipotéticas que transmite la gravedad en una teoría cuántica. En la teoría con dimensiones adicionales los gravitones interaccionan mucho más fuertemente con la materia (equivale esto a que sea más intensa la gravedad a distancias cortas); por tanto, en las colisiones de partículas a altas energías deberían producirse muchos más. Se propagan, por añadidura, en todas las dimensiones y sustraen energía de la pared, o membrana, es decir, del universo donde vivimos.

Cuando una estrella se derrumba y estalla constituida en supernova, las grandes temperaturas podrían fácilmente hacer que los gravitones se evaporasen hacia las dimensiones adicionales. Sin embargo, por las observaciones de la famosa Supernova 1987A sabemos que una explosión de supernova emite la mayor parte de su energía en forma de neutrinos, con lo que queda poco margen para las pérdidas de energía debidas a los gravitones. Lo que conocemos de las supernovas limita, pues, la fuerza con que los gravitones pueden acoplarse a la materia. Esta ligadura podría fácilmente haber matado la idea de las dimensiones supernumerarias grandes, pero el cálculo detallado muestra que la teoría sobrevive. El límite más riguroso es para el caso de que haya sólo dos dimensiones adicionales, porque entonces los gravitones enfriarían las supernovas demasiado si la escala de Planck se redujese por debajo de los 50 TeV. Para tres o más dimensiones adicionales, esa escala puede ser de tan sólo unos TeV sin que se produzca el fiasco de la supernova.

Los teóricos han examinado otras restricciones, ligadas a cambios inaceptables que pudiesen sufrir sistemas muy diversos, del universo primitivo, según lo concibe la afortunada hipótesis de la gran explosión, a las colisiones de rayos cósmicos de energías ultra-altas. La teoría supera todas esas pruebas experimentales, que al final son menos rigurosas que la ligadura de las supernovas. Puede que sorprenda, pero las ligaduras pierden rigor a medida que se añaden más dimensiones a la teoría. Lo hemos visto desde el principio: el caso de una sola dimensión adicional se descartó de inmediato porque alteraría la gravedad a distancias del orden de las del sistema solar. Esto indica por qué es más seguro tener dimensiones supernumerarias; la intensificación espectacular de la gravedad comienza a distancias más cortas y tiene, por tanto, un impacto menor en los procesos de grandes distancias.

La respuesta, de aquí a diez años

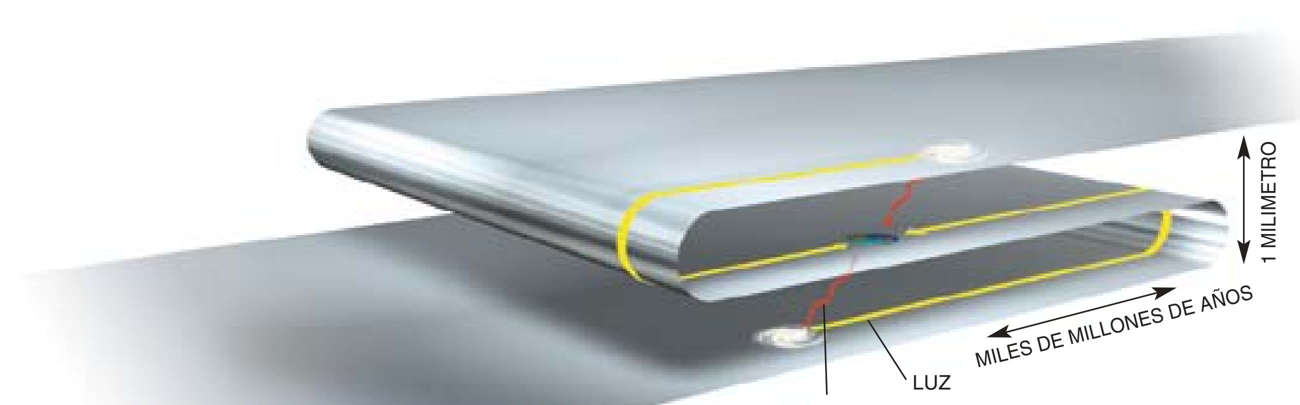
La teoría resuelve el problema de la jerarquía haciendo de la gravedad una fuerza intensa cerca de las energías del orden del TeV, precisamente la escala de energía que los próximos aceleradores de partículas van a investigar. Los experimentos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), previstos para el 2005, deberían, pues, descubrir la naturaleza de la gravedad cuántica. Si la teoría de cuerdas es la descripción correcta de la gravedad cuántica, las partículas consistirían en pequeños fragmentos de cuerda que vibran como la de un violín. Las partículas fundamentales conocidas corresponden a una cuerda que no vibra, una cuerda de violín sin tañer. Cada "nota musical" diferente que la cuerda diese al vibrar se manifestaría como una nueva partícula exótica. En la teoría de cuerdas ordinaria las cuerdas miden sólo 10^{-35} metros; las nuevas partículas tendrían masas del orden de la energía de Planck tradicional: la música de cuerdas así sería demasiado aguda para que la "oyésemos" en los colisionadores de partículas. Pero con dimensiones adicionales grandes las cuerdas serían mucho más largas, tendrían cerca de 10^{-19} metros, y las partículas nuevas aparecerían a energías del orden del TeV, un tono suficiente para oírlas en el LHC.

De manera similar, las energías necesarias para crear microagujeros negros en las colisiones de partículas se reducirían hasta estar a tiro de los experimentos. Esos agujeros, de unos 10^{-19} metros de tamaño, serían demasiado pequeños para causar problemas: emitirían una energía llamada radiación de Hawking y se evaporarían en menos de 10^{-27} segundos. Merced a la observación de tales fenómenos podríamos investigar directamente los misterios de la física de los agujeros negros cuánticos.

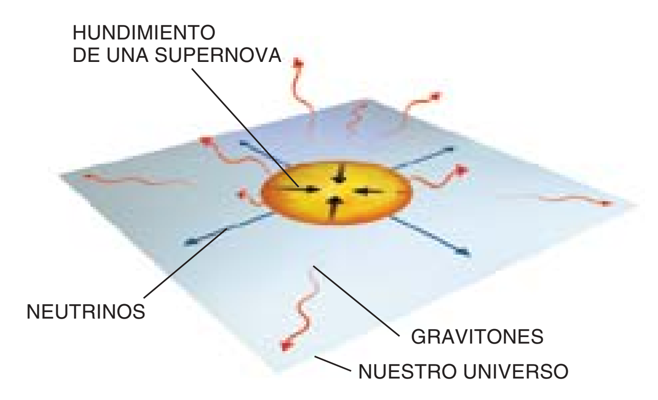
Incluso a energías demasiado pequeñas para producir cuerdas vibrantes o agujeros negros, las colisiones de partículas producirán gravitones en cantidad ingente, proceso despreciable en las teorías ordinarias. Aunque los experimentos no podrían detectar directamente los gravitones emitidos, conoceríamos la energía absorbida a través de la energía que faltara en los residuos de la colisión. La teoría predice propiedades concretas de la energía perdida —cómo variaría con la energía de colisión, etc.—, así que los indicios de la producción de gravitones se distinguirían de otros procesos que roban energía por medio de partículas que no se ven. Los datos actuales de los aceleradores de mayor energía ya imponen suaves restricciones a las dimensiones grandes. Los experimentos del LHC deberían obtener pruebas de la presencia de gravitones o, con su ausencia, empezar a desechar la teoría.

Un tipo completamente diferente de experimento podría también respaldar la teoría, quizá mucho antes que los colisionadores de partículas. Recuérdese que, para que dos dimensiones adicionales resuelvan el problema de la jerarquía, deben medir nada menos que un milímetro. Las mediciones de la gravedad detectarían en ese caso la conversión de la ley de la inversa del cuadrado de Newton en una ley de la inversa de la cuarta potencia a distancias cercanas al milímetro. Las ampliaciones del marco teórico básico conducen a una multitud de posibles desviaciones de la gravedad newtoniana, la más interesante de las cuales es la aparición de fuerzas *repulsivas* más de un millón de veces más intensas que la gravedad entre masas separadas por menos de un milímetro. Están en marcha en las mesas de laboratorios experimentos que emplean detectores construidos para comprobar la ley de Newton a distancias que van del centímetro a las decenas de micras.

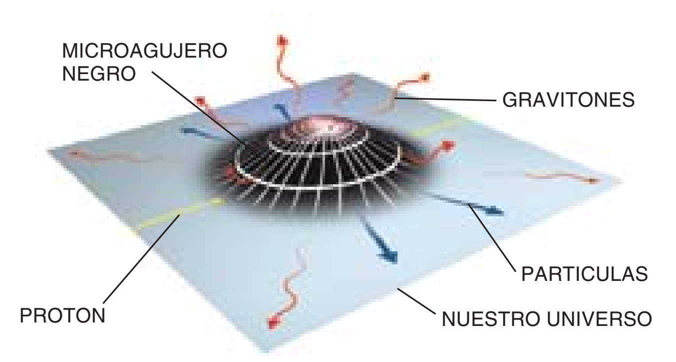
Para investigar la fuerza gravitatoria a distancias submilimétricas hay que usar objetos no mucho mayores que un milímetro; de masa, por tanto, muy pequeña. Se



5. QUIZAS HAYA UNIVERSOS PARALELOS invisibles junto al nuestro, a menos de un milímetro, en sus propias membranas. Tales universos paralelos podrían ser láminas de nuestro propio universo plegado sobre sí mismo. Quedaría revelado el misterio de la materia oscura si hubiese estrellas y galaxias ordinarias en láminas próximas: para llegar hasta nosotros, su gravedad (*rojo*) tomaría un atajo por entre las dimensiones supernumerarias, pero no podríamos verlas porque la luz (*amarillo*) habría de viajar miles de millones de años-luz yendo y viniendo por los pliegues.



6. ESTALLA UNA SUPERNOVA cuando una estrella dotada de abundante masa se desploma y genera una onda de choque explosiva. La mayor parte de la energía se emite en forma de neutrinos (*azul*). Si existiesen dimensiones adicionales, los gravitones radiados (*rojo*) se llevarían más energía que en el caso tridimensional. Las propiedades de las dimensiones adicionales están limitadas por una condición: los gravitones no deben causar el desvanecimiento de la supernova.



7. PODRIAN CREARSE MICROAGUJEROS NEGROS en el Gran Colisionador de Hadrones al chocar protones (*amarillo*) a altas energías. Los agujeros se evaporarían rápidamente emitiendo radiación de Hawking, compuesta de partículas del modelo estándar (*azules*) y gravitones (*rojo*).

han de eliminar con cuidado numerosos efectos, como las fuerzas electrostáticas residuales que enterrarían o simularían la insignificante atracción gravitatoria. Estos experimentos, difíciles y sutiles, podrían descubrir una nueva física. Amén de la búsqueda de dimensiones supernumerarias, importa el que nos permitan ahondar en el conocimiento directo de la gravedad a distancias cortas. Tres investigadores están llevando a cabo experimentos con ese objeto: John C. Price, de la Universidad de Colorado, Aharon Kapitulnik, de la de Stanford, y Eric G. Adelberger, de la de Washington. Esperan recabar los primeros resultados el año en curso.

La idea de dimensiones adicionales prolonga la tradición copernicana del conocimiento de nuestro lugar en el mundo: ni la Tierra es el centro del sistema solar, ni el Sol centro de nuestra galaxia, siendo ésta una entre miles de millones de un universo sin centro. Nuestro universo tridimensional sería ahora una membrana insignificante en el espacio cabal de las dimensiones. Si pensamos en cortes a través de las dimensiones supernumerarias, nuestro universo ocuparía un punto infinitesimal en cada corte, rodeado por un vacío.

Quizá no acaben ahí las cosas. Igual que la Vía Láctea no es la única galaxia del universo, ¿cabría que nuestro universo no estuviese sólo en las dimensiones supernumerarias? Las membranas de otros universos tridimensionales podrían hallarse paralelas a la nuestra, a un milímetro de nosotros en las dimensiones adicionales. De manera semejante, aunque todas las partículas del modelo estándar deben adherirse a nuestro universo membrana, otras partículas más allá del modelo estándar podrían, además del gravitón, propagarse a través de las dimensiones supernumerarias. Lejos de estar vacías, las dimensiones adicionales quizá tendrían una multitud de estructuras interesantes.

Los efectos de las nuevas partículas en las dimensiones adicionales proporcionarían respuestas a muchos misterios sobresalientes de la física de partículas y la cosmología. Podrían, por ejemplo, explicar las masas de los neutrinos. Las nuevas e impresionantes pruebas obtenidas por el experimento Super Kamiokande en Japón indican que los neutrinos, en contra de lo que se ha supuesto durante mucho tiempo, tienen masa, minúscula pero no nula [*véase* "Detección de la masa de los neutrinos", por Edward Kearns, Takaaki Kajita y Yoji Totsuka, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1999]. El neutrino quizás adquiera esa masa mediante la interacción con un campo compañero existente en las dimensiones supernumerarias. Como pasa con la gravedad, la interacción se diluye mucho al estar disperso el compañero por las dimensiones adicionales, y así el neutrino sólo adquiere una masa muy pequeña.

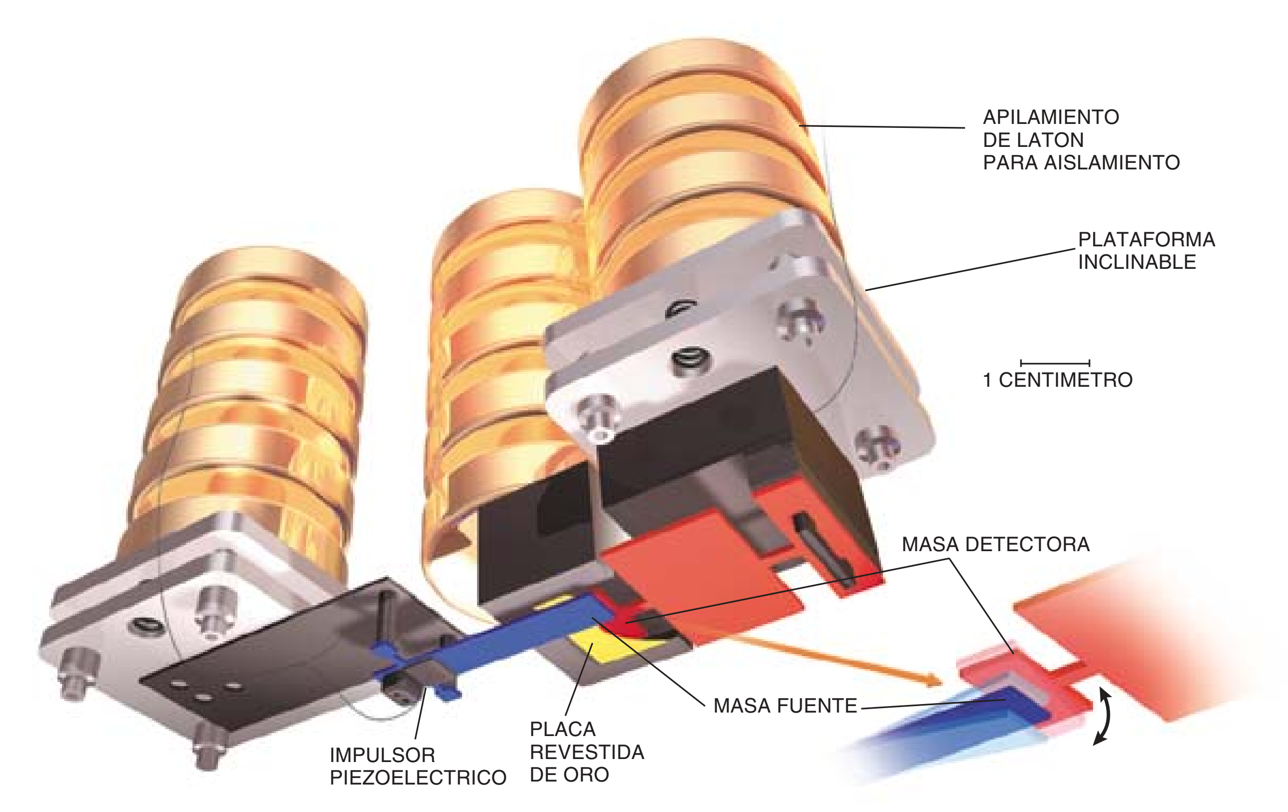
Universos paralelos

Otro ejemplo es el misterio cosmológico de la constitución de la "materia oscura", la sustancia gravitante invisible que parece componer más del 90 por ciento de la masa del universo. La materia oscura podría residir en universos paralelos. Afectaría a muestro universo por medio de la gravedad; es "oscura" por necesidad, ya que nuestra especie de fotón está adherida a nuestra membrana y no puede, pues, viajar a través del vacío desde la materia paralela hasta nuestros ojos.

Esos universos paralelos podrían diferir en grado sumo del que habitamos, con partículas y fuerzas peculiares; quizás estarían confinados en membranas de más o de menos dimensiones. No obstante, una sugestiva posibilidad es que tuviesen propiedades idénticas a las de nuestro mundo. Imagínese que la pared donde vivimos está plegada una serie de veces en las dimensiones adicionales. Los objetos al otro lado de un pliegue parecerán hallarse muy lejos aunque se encuentren a menos de un milímetro de nosotros en las dimensiones adicionales: la luz que emiten debe viajar hasta el doblez y retroceder hasta nosotros. Si el doblez está a decenas de miles de millones de años-luz, no habría llegado desde el otro lado hasta nosotros luz alguna desde el comienzo del universo.

La materia oscura podría ser materia ordinaria, quizás estrellas y galaxias corrientes que brillen en sus pliegues. Esas estrellas producirían interesantes efectos observables, por ejemplo, ondas gravitatorias procedentes de supernovas y otros procesos astrofísicos violentos. Si los detectores de ondas gravitatorias cuya entrada en funcionamiento está prevista para dentro de unos años registrasen fuentes importantes de radiación gravitatoria que no cupiera atribuir a materia visible de nuestro universo, se habría dado con una prueba de la existencia de los pliegues.

La teoría que hemos presentado aquí no fue la primera hipótesis avanzada sobre la existencia de dimen-



8. ESTE OSCILADOR DE TORSION de la Universidad de Colorado busca cambios de gravedad entre los 0,05 y 1,0 milímetros. Un dispositivo piezoeléctrico hace vibrar la masa fuente de tungsteno (*azul*) como si fuera un trampolín. Cualquier fuerza que actúe entre la masa fuente y el detector de tungsteno (*rojo*) producirá torsiones oscilantes del detector (*recuadro; las oscilaciones están exageradas*), que se captarán electrónicamente. Una placa revestida de oro (*amarillo*) suprime las fuerzas electrostáticas, y la suspensión de apilamiento de latón para aislamiento impide que las vibraciones se propaguen de la fuente al detector. No se muestra el blindaje electrostático donde está encerrado el aparato. Se espera obtener este año resultados a temperatura ambiente (300 Kelvin). Para conseguir una sensibilidad máxima se enfriará el aparato con helio líquido hasta los cuatro grados Kelvin.

siones adicionales de más de 10^{-35} metros. En 1990 Ignatios Antoniadis, de la Escuela Politécnica de París, sugirió que algunas de las dimensiones de la teoría de cuerdas podrían ser de hasta 10^{-19} metros, pero mantuvo la escala de la gravedad cuántica cerca de los 10^{-35} metros. Petr Hořava, del Instituto de Tecnología de California, y Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, señalaron que una sola dimensión adicional de 10^{-30} metros podría incorporar la gravedad en el seno de la unificación supersimétrica de las demás fuerzas, todo a 10^{-32} metros. Siguiendo esta idea, Joseph Lyken, del Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi, en Batavia, se esforzó por disminuir la escala de la unificación a cerca de 10^{-19} metros (sin recurrir a dimensiones supernumerarias grandes). Keith Dienes, de la Universidad de Arizona, y Emilian Dudas y Tony Gherghetta, del CERN, observaron en 1998 que las dimensiones adicionales menores de 10^{-19} permitirían la unificación de las fuerzas a distancias mucho mayores de 10^{-32} metros.

Desde nuestra propuesta de 1998 han ido apareciendo diversas variaciones interesantes basadas en los mismos ingredientes: dimensiones supernumerarias y confinamiento de nuestro universo en una pared. En modelo apasionante, Lisa Randall, de la Universidad de Princeton, y Raman Sundrum, de Stanford, propusieron que la propia gravedad podría concentrarse en una membrana de un espacio-tiempo pentadimensional infinito en todas las direcciones. La gravedad se manifestaría muy débilmente en nuestro universo de forma natural si estuviésemos en una membrana diferente.

Durante veinte años se ha venido abordando el problema de la jerarquía y, por tanto, explicando la levedad extrema de la gravedad, desde una escala de Planck cercana a los 10^{-35} metros, supuesta fundamental, y desde la idea de que la física de partículas debe cambiar cerca de los 10^{-19} metros. La gravedad cuántica permanecería en el terreno de la pura especulación, a extramuros de cualquier ensayo experimental. Pero si hay dimensiones adicionales grandes, en los próximos años podríamos descubrir, por ejemplo, desviaciones de la ley de Newton cerca de 6×10^{-5} metros y detectar vibraciones de las cuerdas o agujeros negros en el LHC. La gravedad cuántica y la teoría de cuerdas se convertirían en ciencia contrastable. Pase lo que pase, los experimentos marcarán el camino para responder a una pregunta formulada hace trescientos años. De aquí al 2010 se avanzará en el conocimiento del porqué de la levedad de la gravedad. Y quizá nos encontremos con que vivimos en una extraña Planilandia, un universo membrana donde la gravedad cuántica está a la vuelta de la esquina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LA TEORÍA M. Michael Duff, en *Investigación y Ciencia*, págs. 48-53; abril de 1998.

THE ELEGANT UNIVERSE: SUPERSTRINGS, HIDDEN DIMENSIONS, AND THE QUEST FOR THE ULTIMATE THEORY. Brian Greene. W. W. Norton, 1999.

La espada del Cid

La hoja de la supuesta Tizona, la espada del Cid, pertenece al siglo XI. Su estructura está formada por un acero suave en el interior y otro duro en la capa externa

Antonio José Criado, Juan Antonio Martínez, José Manuel Jiménez y Rafael Calabrés

La legendaria Tizona fue la espada favorita de Rodrigo Díaz de Vivar, *el Cid*. Nacido en la burgalesa Vivar, entre 1043 y 1048, Rodrigo murió en Valencia en julio de 1099, cansado y enfermo. Su figura representa al héroe medieval por excelencia, unas veces generoso y otras avaro, piadoso y cruel, pero siempre valiente. Pese a su origen castellano, el Cid fue el último héroe mozárabe de la España musulmana.

Tizona, *La Rabiosa*, como la llamaba Rodrigo, es una espada tajadora andalusí, apta para la caza y el combate a caballo. Ha llegado hasta nosotros con notables manipulaciones, responsables de que los historiadores y especialistas, guiándose por la tipología de su empuñadura y por las inscripciones renacentistas en los vaceos, la fecharan como una reproducción realizada en el siglo XV.

Sin embargo, el estudio científico llevado a cabo en el laboratorio de tecnología mecánica y arqueometalurgia de la Universidad Complutense de Madrid ha llegado a la conclusión de que, si bien la empuñadura y las inscripciones se realizaron varios siglos después, la hoja acerada se forjó y templó en la primera mitad del siglo XI.

La espada se encuentra hoy en día en depósito en el Museo del Ejército de Madrid, y es propiedad de los actuales marqueses de Falces, gracias a los cuales, conjuntamente con la ayuda de la Subdirección General de Acción Cultural y Patrimonio Histórico del Ministerio de Defensa y el Ayuntamiento de Burgos, ha sido posible este estudio.

Un antepasado de los actuales marqueses de Falces, Mosén Pierres de Peralta, recibió la espada de manos de la reina Isabel I de Castilla, como premio a sus servicios durante la conquista de Granada en 1492. Su periplo histórico, seguido a retazos, se nos aparece en momentos singulares de la historia de España.

A la muerte del Cid, la espada pudo pasar a formar parte del tesoro de los reyes castellanos a través de su sobrino Pedro Bermúdez o de su hija Cristina Elvira, si no directamente a través del rey Alfonso VI. Posteriormente, la espada cayó en manos de Jaime I de Aragón, quien la empuñó en la conquista de Valencia en 1238. A partir de ese momento se la localiza en la armería de Pedro IV el Ceremonioso, quien la citaba en su testamento en 1370. La encontramos luego en la Cámara Real del rey Don Martín, para heredarla más tarde Fernando de Antequera, quien se la dona en regalo a su sobrino Don Juan II.

En 1453 aparece Tizona incluida en el inventario del Tesoro de Castilla, entre las joyas que Don Alvaro de Luna custodiaba en el Alcázar de Madrid. El lote enriquecería posteriormente el tesoro real de Juan II. Entre 1560 y 1621, fray Prudencio de Sandoval realiza una detallada descripción de la espada, guardada en el castillo de Morilla, mayorazgo de los Falces.

El 23 de julio de 1936, a comienzos de la guerra civil, se crea en Madrid una Junta para intervenir los objetos de arte y trasladarlos a museos, con el fin de salvaguardarlos durante la contienda. La espada, junto con los documentos de otorgación y legitimación, es recogida en el domicilio de los marqueses de Falces. Con Madrid asediado, las obras del Tesoro Artístico se trasladan a Valencia. De aquí, viajan, por orden del gobierno, a Barcelona. Tizona se deposita en el castillo de San Fernando de Figueras, de donde se transfirió a Ginebra.

A comienzos de la segunda guerra mundial, el mariscal Pétain devuelve a Franco el Tesoro Artístico Español, retornando Tizona a sus legítimos dueños, quienes, en depósito, la ceden al Museo del Ejército de Madrid. En una larga tradición secular, había servido para prestar juramento en la coronación de los reyes de Castilla y, luego, de los reyes de España, hasta la llegada de los Borbones.

Este ir y venir entre los Falces y los reyes, ha tenido como consecuencia un deterioro progresivo a causa de lijados, pulidos y limpiezas mal realizadas para ponerla en estado de revista. Si a este trasiego le añadimos que le quitaron la empuñadura original, cambiándola por la actual en la época de los Reyes Católicos, así como el grabado químico de las dos inscripciones en mayúsculas renacentistas en ambos vaceos: "*AVE MARIA GRATIA PLENA DOMINUS MECUM*" y "*IO SOI TIZONA FUE FEChA EN LA ERA DE MILE QVARENTA*", tendremos un efecto algo desolador. La cara de la

ANTONIO JOSE CRIADO, JUAN ANTONIO MARTINEZ, JOSE MANUEL JIMENEZ y RAFAEL CALABRES pertenecen al grupo de investigación de tecnología mecánica y arqueometalurgia de la facultad de ciencias químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Criado y Martínez son profesores del departamento de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica, donde Jiménez y Calabrés preparan su tesis doctoral.





1. TIZONA, la espada legendaria favorita de Rodrigo Díaz de Vivar, *el Cid*. Mide 933 milímetros de la punta a la empuñadura y pesa 1,153 kg. La longitud de su hoja recta es de 785 mm, con un ancho de 43 mm junto al recazo. Se observa el aspecto antes y después de la limpieza efectuada, conjuntamente con la asimetría de la actual empuñadura.

hoja más desgastada es la que reza "*AVE MARIA GRATIA...*"; en ella ha desaparecido parte de la capa exterior cementada, lo que ha producido un ligero arqueado hacia ese lado, a causa de las tensiones acumuladas.

Otros deterioros importantes afectan a la punta y aledaños. Se observa la presencia de pequeñas grietas y una zona requemada, debida quizás a un reforjado posterior, en que se trató de reparar algún tipo de mella existente. Las radiografías muestran también un reforjado de la parte de la espiga, con un posible acortamiento de la hoja, resultado de alguna reparación o tal vez parte del proceso del montaje de la empuñadura actual. Los estudios realizados en nuestro laboratorio permiten deducir que el resto de la hoja sí corresponde a la original, sin que se haya realizado ningún tipo de manipulación en ella.

El arma ha sufrido una notable corrosión superficial en el curso del tiempo. Aparecen abundantes picaduras, que atraviesan la capa dura carburada y llegan al núcleo de hierro, con la degradación consiguiente del anclaje de la capa superficial endurecida con el núcleo tenaz de hierro.

A la recepción de la espada en nuestro laboratorio, la hoja acerada traía como protección una fina capa de laca (copal) metalizada en hierro. Dicha capa, dada a pinceladas que quedaron marcadas, enmascaraban el auténtico color del acero y disimulaban un lijado de enorme magnitud, realizado previo al lacado para quitar el óxido. Con toda probabilidad ésta fue la actuación más nefasta sobre la hoja de acero de Tizona, después de la restauración del arma por forja en caliente y de la operación de grabado de las inscripciones.

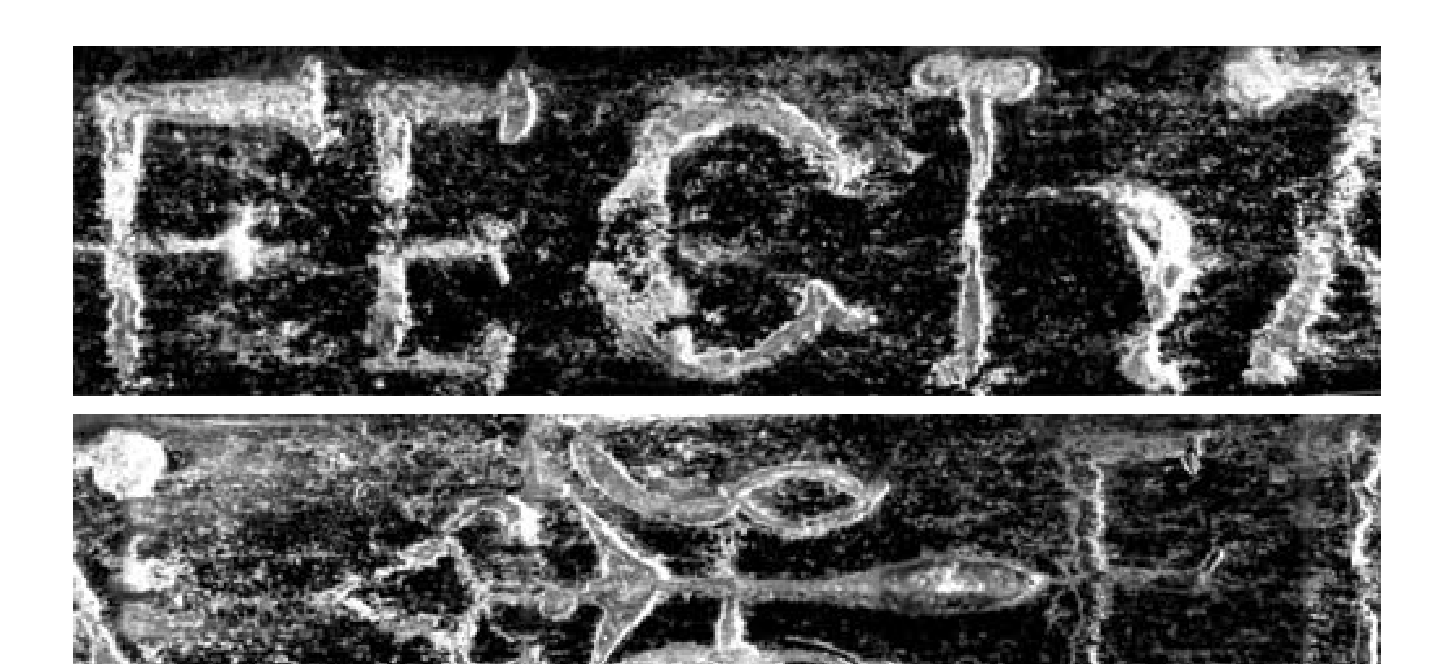
La excelente calidad del acero y la habilidad técnica con la que se fabricó han conseguido que resista el paso del tiempo, no obstante los escasos conocimientos de conservación que tuvieron muchos de sus cuidadores posteriores.

Una parte del trabajo del estudio de Tizona ha consistido en la limpieza y preservación del metal que evite mayor degradación. Hemos eliminado, con disolventes, la capa de laca metalizada de la hoja y retirado, mediante pasta de diamante diluida en etilenglicol, el óxido incrustado en su superficie.

Para proteger la hoja contra la corrosión, aplicamos una resina nitrocelulósica disuelta en acetona, fácilmente eliminable con acetona o tricloroetileno. El polímero en cuestión, inerte, destaca por su resistencia al rayado, al calor y a la acción de ambientes agresivos; aísla la pieza del oxígeno y la humedad. La ausencia de brillo y color permite la observación de la hoja de acero en su auténtico aspecto.

Se ignoraban su técnica de fabricación, procedencia geográfica y datación. Nosotros lo abordamos desde un triple enfoque. El estudio mecánico y metalográfico nos habría de permitir determinar la estructura y la técnica utilizada en la fabricación; nos serviríamos de las técnicas de dureza superficial al rebote, microscopía óptica y electrónica de barrido, microsonda electrónica y difracción de rayos X. El análisis químico de las impurezas nos indicaría la procedencia local del acero; nos valdríamos de la técnica de análisis por espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP/AES). Por último, nos ocuparíamos del estudio metalográfico cuantitativo del envejecimiento de la microestructura, y compararíamos los resultados de Tizona con piezas arqueológicas de acero de diferentes épocas, perfectamente datadas.

A través del estudio mecánico y metalográfico, hemos comprobado que Tizona posee una hoja singular, forjada con pericia por un experto maestro herrero. En su sección transversal, se observa que la hoja está formada, al viejo estilo medieval, por dos aceros diferentes: uno muy suave en el interior y otro duro en la corteza exterior (con contenidos en carbono aproximados de alrededor del 0,1 % y del 0,9 % en masa, respectivamente). Se obtenía esa corteza a partir de la forja de una lu-



2. IMAGENES AMPLIADAS de los caracteres renacentistas de la inscripción "IO SOI TIZONA FUE FEChA EN LA ERA DE MILE QVARENTA", y del cuño presente en el mismo lado de la hoja. Se inscribieron mediante grabado al ácido y en fecha posterior a su forja en el siglo XI. El severo ataque al ácido deterioró irremediablemente la capa externa cementada, inutilizándola para el combate. Las roturas de la capa dura, constituidas por las letras y símbolos, hubieran engendrado grietas de fractura, en caso de someter la hoja a una flexión pronunciada.

pia de hierro y su posterior cementación.

Hemos contrastado la técnica empleada con la aplicada en aceros cementados que van desde la edad del Hierro hasta el califato de Córdoba. Para ello analizamos aceros de Numancia (siglos II y I a. C.), Villanueva de Teba (siglos IV y III a. C.), Villatobas (siglos III y II a. C.), Cerro Muriano (siglos I a. C. y I d. C.), Castillo de Cartella (siglos XI al XIII d. C.) y Plaza de Armas (siglos IX al XI d. C.). Merced a ese repaso hemos comprobado el notable grado de conocimiento que en España se ha tenido de la cementación del hierro a lo largo de la historia.

La existencia de cementación posterior a la forja se ve refrendada por la suave transición entre las zonas de diferente composición en carbono. No se observa ninguna interfase clara, con presencia de impurezas, escorias u óxidos, que pudieran marcar los límites originales de dos aceros de distinta composición soldados por forja.

Se han efectuado los correspondientes cálculos para determinar el tiempo de cementación y la profundidad de penetración.

Originalmente, la capa exterior de acero duro de Tizona tuvo una profundidad media de 0,4 a 0,5 mm. Pero el uso continuado de abrasivos para su limpieza provocó su desaparición casi completa en algunos lugares, como ocurre en la cara donde reza: *"AVE MARIA GRATIA PLENA DOMINUS MECUM"*.

La dureza varía de los 59 a los 63 HRC, en la cara que conserva la capa cementada, hasta los 25 HRC en la cara desgastada antes citada. (En esta escala numérica, la cifra representa la dureza de un metal. Bajo las condiciones normales de carga, se presiona con una punta de diamante en el metal sometido a ensayo, y el número de dureza equivale a la profundidad de penetración.)

Hay que hacer notar que el ensayo de dureza del arma se realizó al rebote, habiéndose efectuado la conversión a la escala de dureza más utilizada en aceros.

El maestro herrero endureció la hoja de acero de Tizona con un doble temple bien administrado, primero desde 890-925 ºC y posteriormente desde 780 ºC, interrumpiendo las inmersiones en agua salinizada con salmuera; mostró habilidad y conocimiento suficientes para provocar la aparición de estructuras tenaces y duras, pero no frágiles.

El maestro herrero dominó, pues, el calentamiento y temple correctos para cada uno de los aceros componentes de la hoja. Consiguió un tamaño de grano fino y muy tenaz para el acero del interior, así como una estructura mezcla de perlita fina, bainitas y martensita para el acero duro de la corteza. El resultado fue una hoja de acero compuesto, de gran flexibilidad, dureza, tenacidad y filo cortante indesgastable; todo ello en un conjunto de hoja tajadora útil para la caza a caballo y el combate. Para evitar la fractura en los golpes contundentes, la parte de la empuñadura posee una carburación menos intensa y un temple más suave.

Debido al gran contenido de carbono en superficie y la presencia masiva de bainita y martensita de la hoja, su limpieza y abrillantado obtienen un brillo metálico blanquecino intenso, de un tono plateado característico. Al acero duro de alto contenido en carbono (mayor del 1 %), rectificado y pulimentado superficialmente, se le sigue llamando "acero plata".

El análisis de las impurezas del acero de Tizona nos lleva a su origen de procedencia. Las impurezas están relacionadas con el mineral utilizado y los fundentes empleados en la extracción del metal. Pues bien, la naturaleza de los contaminantes y su relación porcentual cuantitativa son similares a las registradas en minerales, hierros y aceros fabricados

en la cora califal de Firrish, al norte de Córdoba, y en Constantina, en la cora de Sevilla.

La comparación del acero de Tizona con minerales, hierros y aceros de las coras andalusíes nos induce a pensar que se fabricó en el sur de España. Del examen de hierros y aceros califales encontrados en Toledo, Sevilla, Cádiz y Córdoba se desprende una misma procedencia. Lo que no debe extrañarnos. Historiadores y geógrafos de la época califal y de los reinos de taifas atestiguan la importancia de sus yacimientos por el volumen de mineral extraído y su calidad.

Remontándonos en el tiempo, muchas de las *falcatas* ibéricas se fabricaban con mineral de la misma procedencia, como es el caso del magnífico lote de Almedinilla (Castro del Río en Córdoba). La calidad de las falcatas del sur de la península queda acreditada en el momento en que el general cartaginés Aníbal la impone como arma reglamentaria de su ejército. No debían de ser tan malos los aceros de esta región de Hispania, cuando el *gladius hispalensis*, o *hispanensis*, terminó siendo, también, el arma regular de los legionarios romanos al adueñarse de la Bética.

Por otro lado, el análisis químico comparado de minerales y piezas arqueológicas de hierro y acero de muy diversas procedencias de Europa y Africa, nuestro y de otros autores, descarta cualquier procedencia que no sea la andalusí. Para depurar aún más nuestra investigación, aplicamos el análisis isotópico de masas a la impureza en plomo de Tizona. Las relaciones isotópicas Pb^{208}/Pb^{204}, Pb^{207}/Pb^{204} y Pb^{206}/Pb^{204} son características de cada yacimiento del metal; también aquí parece confirmarse su origen andalusí.

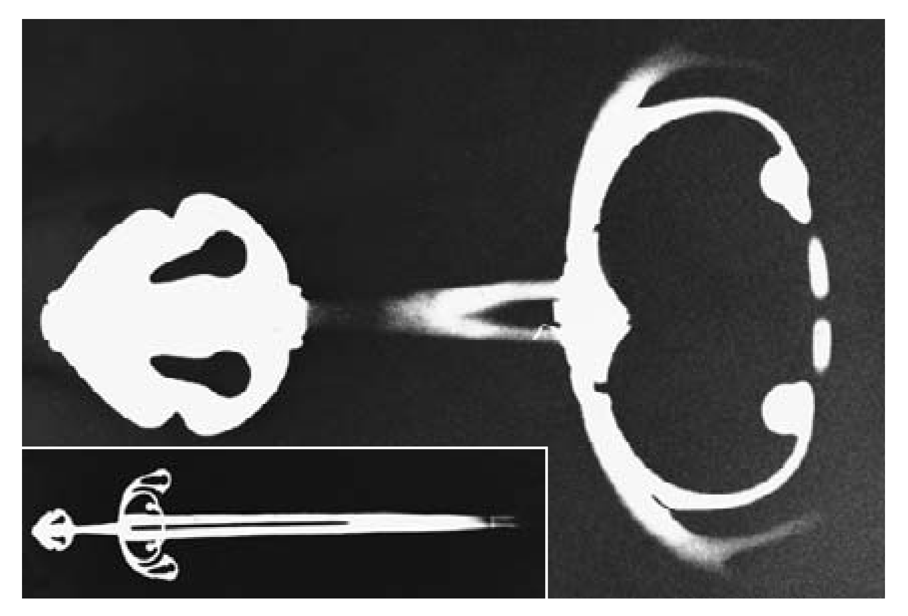
Especial interés reviste la datación de Tizona. Si atendemos a la tipología y características de las inscripciones de los vaceos y la empuñadura, hay que situar la pieza en fecha posterior al siglo XI. La empuñadura actual, realizada en hierro forjado, presenta una tipología "imperial", de la época de Carlos I; está formada por dos gavilanes vueltos hacia abajo, calados y unidos por una barreta al ancho de la hoja, rodeándola y volviéndose en ángulo recto hacia el interior, originando dos patillas lisas, que rematan en bolas esféricas. El pomo, aplanado y calado, adopta la forma de hoja de peral. El puño, de madera apergaminada, muestra huellas de haber sufrido labores de realce en metales nobles (cuyos restos se aprecian en las radiografías). Según las crónicas de la época, la empuñadura original estaría guarnecida de oro, plata, pedrería, marfil y otros materiales preciosos.

Las inscripciones en letra capital renacentista se han realizado mediante grabado al ácido, lo que supuso la destrucción de la capa carburada externa, algo impensable en manos del maestro herrero que forjó la pieza. Esta rotura de la capa dura carburada de la espada, que la hizo inservible para el combate, confirma que las inscripciones se realizaron muy posteriormente a la fabricación de la hoja acerada, por alguien que desconocía la estructura interna y la técnica de conformación. La leyenda "*IO SOI TIZONA FUE FEChA EN LA ERA DE MILE QVARENTA*" resulta totalmente anacrónica; una espada moruna no se fecharía en castellano y siguiendo la cronología cristiana. Pero tampoco parece probable que en pleno siglo XVI se fechase por la era antigua, abandonada 300 años antes, salvo que el grabador buscara de intento una ambientación del texto. Ese mismo criterio puede aplicarse a la otra inscripción: "*AVE MARIA GRATIA PLENA DOMINUS MECUM*", de imposible ubicación en un entorno islámico.

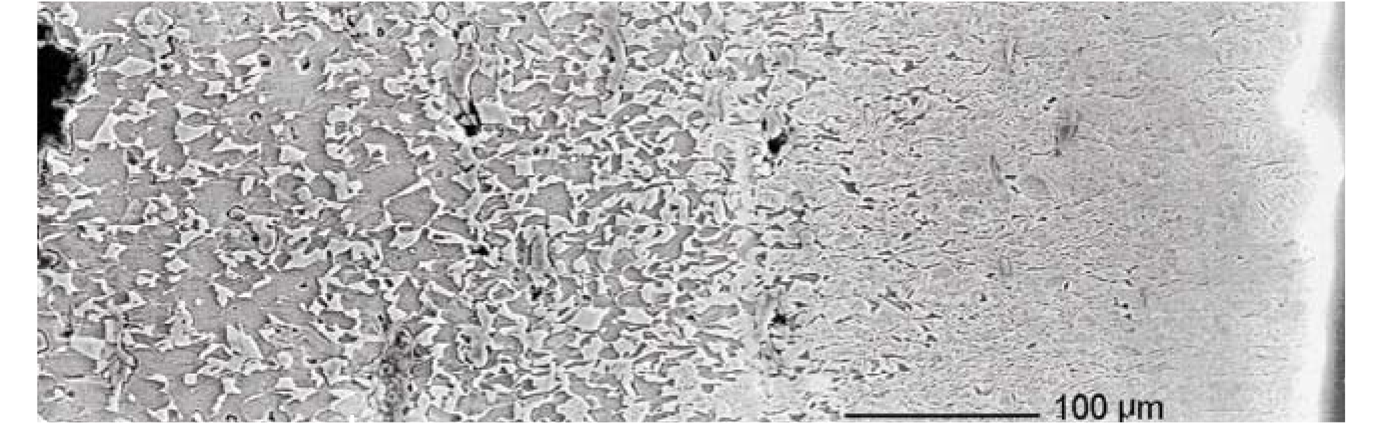
El principal problema, como sucede siempre en las espadas, radica en la hoja. Las investigaciones anteriores se han venido fundando en la tipología, con resultados confusos o al menos poco concluyentes. Por eso nosotros hemos optado por un estudio metalográfico cuantitativo de la evolución de la microestructura con el tiempo, tomando como instante cero el momento de su fabricación.

La variación de la estructura metalúrgica interna original de un acero se produce en virtud de un proceso difusivo lento a temperatura ambiente. Tales cambios aparecen con notable nitidez si recurrimos a la microscopía electrónica de barrido. Los cristales de ferrita segregan el carbono retenido en forma de cristales idiomórficos con morfologías de placas prismáticas, mientras que la cementita de la perlita tiende a constituir estructuras cristalinas, también en forma de placas prismáticas de gran tamaño, con cierta tendencia al escalonamiento y esferoidización. Para las morfologías bainíticas y de perlita fina, el cambio se expresa en la generación de grandes bloques de ferrita en los que los carburos tienden a adquirir una apariencia esferoide. La cuantificación de estos cambios estructurales con respecto al tiempo constituye la base de la datación de hierros y aceros de piezas arqueológicas.

Los cambios estructurales mencionados se aprecian en todas las estructuras descritas. La ferrita presenta una abundante precipitación de carburos de hierro; y las bainitas y perlitas finas, de cementita esferoidizada, alineada en rosarios a lo largo



3. RADIOGRAFIA GENERAL DE TIZONA y de su empuñadura en detalle. Se observan las reparaciones realizadas en la misma, concretamente la continuación del vaceo central a lo largo de la espiga, indicativo de un mecanizado posterior para adaptarle la actual empuñadura.



4. LA TRANSICION, sin una interfase clara, libre de impurezas, escorias y óxidos, desde el acero suave del alma de la hoja (0,1 % en masa de carbono), más blando y tenaz, en la parte izquierda, hasta la corteza exterior cementada (0,9 % en masa, de carbono), más dura y resistente, permite deducir el proceso de forja y posterior cementación empleado en la manufactura.

de algunos planos de los cristales longilíneos de la ferrita. Ese envejecimiento estructural provoca un relajamiento de la estructura, con la pérdida consiguiente de elasticidad y resistencia mecánica, aunque la tenacidad no se ve afectada.

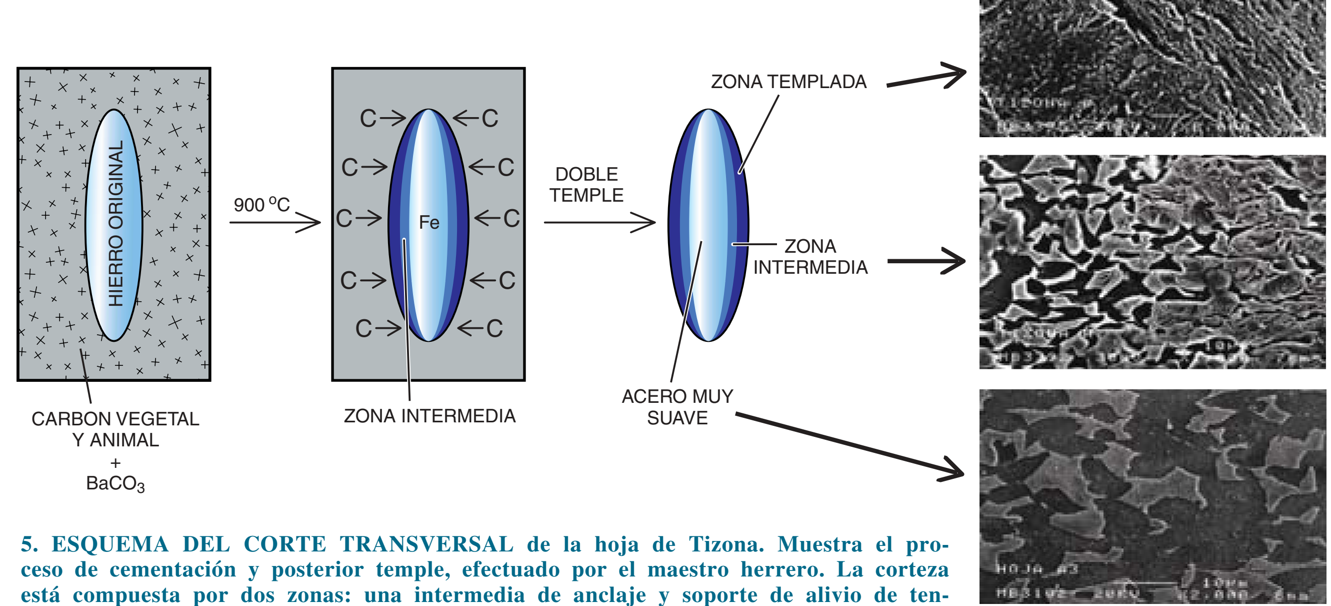
En su conjunto, se trata de procesos controlados por la lenta difusión del carbono en ferrita a temperatura ambiente, de manera que se produzca la evolución hacia morfologías más estables. La energía disponible para el proceso difusivo proviene de varias fuentes, según la estructura de partida: energía superficial de los cristales, sobresaturación de carbono en ferrita y energía mecánica acumulada en los procesos de conformación plástica.

La precipitación de carburos y, sobre todo, el crecimiento de éstos en el seno de los cristales de ferrita dependen del tiempo transcurrido desde la forja. Este crecimiento, representado por el espesor medio de las partículas, depende, a su vez, del tiempo, de la difusión del carbono en ferrita a temperatura ambiente y de la concentración de carbono en ferrita.

A través de un formalismo matemático, no excesivamente complejo, en que intervienen esas variables, se llega a la conclusión de que la hoja de Tizona tendría unos 950 años de antigüedad, es decir, se fabricaría en la primera mitad del siglo XI. Esperamos acotar muy pronto la fecha con un margen de error inferior a un decenio.

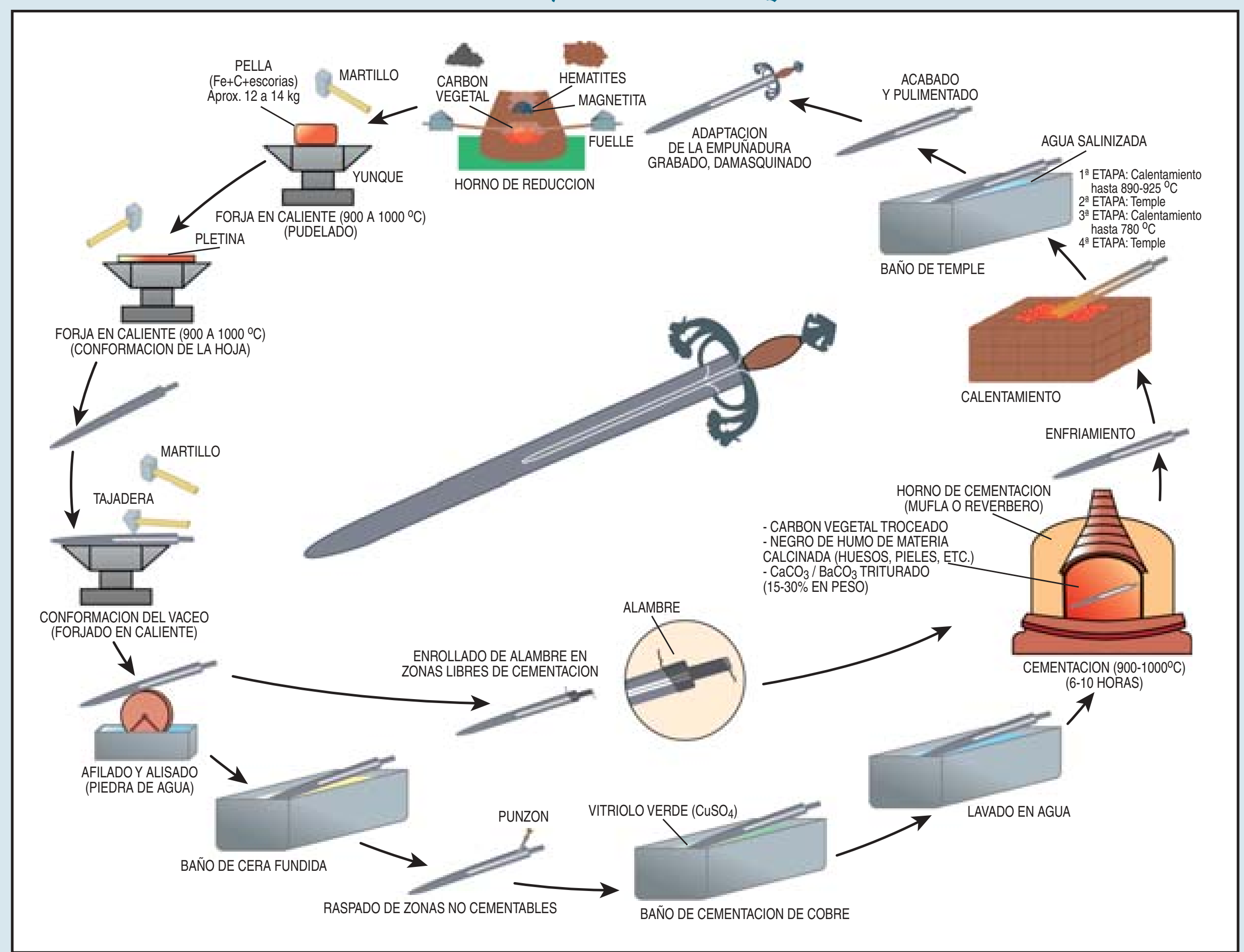
Las conclusiones obtenidas con el modelo matemático se han contrastado con un estudio comparativo del estado de evolución microestructural con piezas medievales de diferentes edades perfectamente datadas, procedentes de yacimientos arqueológicos y museos. Tanto los análisis metalográficos cuantitativos, como los cualitativos de comparación, refrendan la antigüedad de la hoja acerada de Tizona.

Si a ello sumamos el rastreo histórico de la literatura árabe de la época del califato de Córdoba y de los reinos taifas, podemos afirmar que nos encontramos ante la hoja de acero de un tizón, o tizona, como se las denominaba en Castilla. Su forma corta, ancha y de espesor delgado la define como una espada tajadora útil para la caza y el combate a caballo. Esa forma inconfundible de la hoja aparece en bajorrelieves de época andalusí, como el de la arqueta de marfil de la catedral de Pamplona, realizada para el caudillo Abd al-Malik



5. ESQUEMA DEL CORTE TRANSVERSAL de la hoja de Tizona. Muestra el proceso de cementación y posterior temple, efectuado por el maestro herrero. La corteza está compuesta por dos zonas: una intermedia de anclaje y soporte de alivio de tensiones, donde predomina la perlita; y una zona más externa, en la que el doble temple efectuado ha producido una estructura constituida por bainitas y martensita. El interior de la pieza mantiene una estructura ferrítica con lagunas de perlita. El resultado de la complicada operación de cementación y temple en dos etapas dota a la hoja de extraordinarias propiedades mecánicas: flexibilidad, dureza, tenacidad y filo cortante indesgastable.

Así se fabricó Tizona

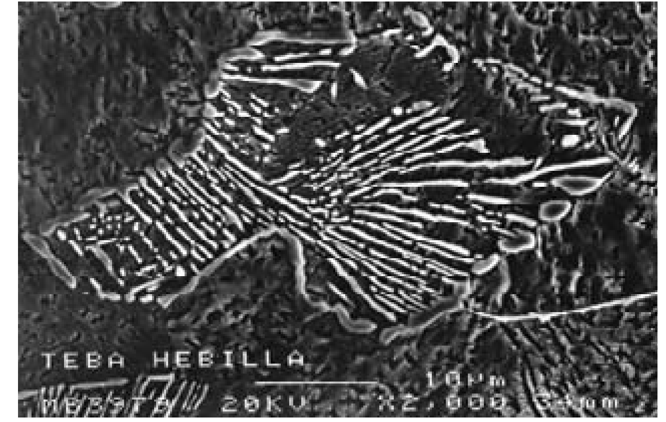


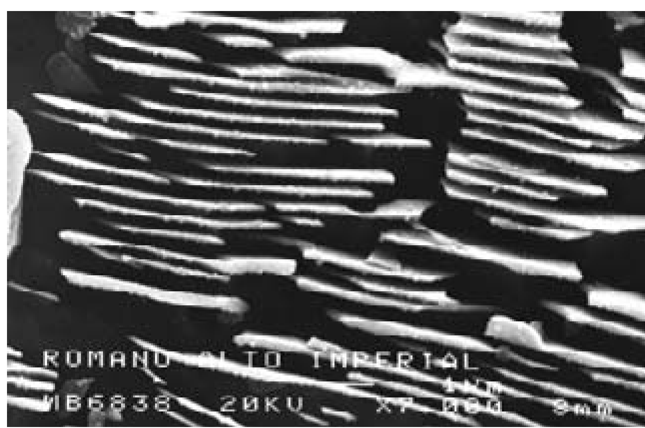
De acuerdo con los experimentos y análisis llevados a cabo en nuestro laboratorio, el proceso constaría de varias etapas secuenciales y pudo ser verosímilmente el que detallamos. En un primer momento, hubo que reducir el mineral de hierro con carbón vegetal. Se pasaría luego a la forja en caliente (900 a 1000 ºC) de la pella de hierro o lupia, dándole la forma definitiva de pletina. Para los subsiguientes vaceos de la hoja se recurriría a una tajadera. Se alisó y afiló luego el arma en una piedra de agua. Antes de acometer la cementación, se protegerían las zonas que se deseaba excluir de la misma, mediante la protección con alambre o cementándolas con cobre por inmersión en un baño de sales de sulfato cúprico; las zonas no cementables en cobre se dejan cubiertas por una capa de cera.

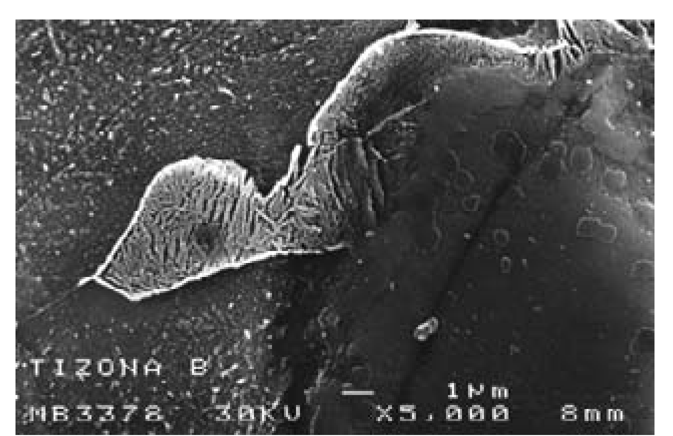
La cementación se realizaría en un horno de reverbero a una temperatura de 900 a 1000 ºC, durante 6 a 10 horas. Se introducía luego la pieza en el horno, conjuntamente con carbón vegetal troceado, materia orgánica (huesos, pieles) y una mezcla de carbonato de calcio y carbonato de bario triturados, en proporción 15 a 30 % en peso.

Tras la cementación, venía el temple. Dividido en dos fases, transcurría la primera desde una temperatura entre 890 y 925 ºC; en una segunda, volvía a calentarse hasta los 780 ºC. El temple se efectuaría en agua salinizada (que aseguraba una buena conductividad térmica), sumergiendo y sacando la hoja acerada en forma perpendicular por la punta, en una cadencia de colores y sonidos, hasta el enfriamiento total del acero. Con este complejo tratamiento de enfriamiento se obtenía la adecuada asociación de estructuras duras, resistentes y tenaces, mediante martensita, bainitas, perlita fina (troostita) y austenita revenida, que producía una distribución de propiedades mecánicas diferentes desde la punta a la empuñadura de la pieza. Así, mientras en la zona próxima a la empuñadura se conseguían durezas que oscilaban entre 45 y 53 unidades Rockwell C, en la punta y zona central se alcanzaban valores superiores a los 63 Rockwell C. La tarea acababa con la pulimentación y montura de la empuñadura.









6. EJEMPLOS DE DIFERENTES ESTRUCTURAS modificadas por envejecimiento estructural en aceros de diversas épocas. Los cambios observados no pueden ser reproducidos en laboratorio debido a que se trata de procesos de cinética lenta a baja temperatura, y que, por tanto necesitan largos tiempos de desarrollo. Cualquier intento de aceleración, empleando mayores temperaturas, produciría morfologías radicalmente distintas: arriba a la izquierda, cristales idiomórficos de carburo de hierro precipitados en ferrita, en una tachuela de la necrópolis ibérica de la burgalesa Villanueva de Teba (siglos IV al III a.C.); a su derecha, placas prismáticas de cementita en una colonia perlítica de un acero, en una hebilla de la misma necrópolis; abajo a la izquierda, placas cristalinas prismáticas de un acero hipereutectoide de un clavo romano alto-imperial de la villa romana de Cerro Muriano (siglos I a.C. y I y II d.C.), y a su derecha, estructura envejecida donde se muestra una corteza de perlita fina asociada a ferrita, junto a un núcleo de escoria, perteneciente a la zona de transición entre el núcleo y la zona dura externa de la hoja de Tizona.

al-Muzafar, hijo de Almanzor, en el año 1005.

En las crónicas de al-Hulal al-Mawsiyya, de la transición de los reinos taifas a la venida de los almorávides, en pleno siglo XI, se lee que éstos adquirían caballos de las marismas del Guadalquivir y de la campiña y serranía de Córdoba; y reclutaban soldados y armas en al-Andalus. El propio Almanzor montó una industria militar de primer orden para llevar a cabo su guerra santa contra el norte peninsular cristiano.

A propósito de la industria militar califal cordobesa de finales del siglo X y principios del siglo XI, tenemos un testimonio valioso de un informador de Ibn Hayyan. Cuenta que Abu-l-'Abbas al-Bagdadi', de origen oriental y maestro artesano de Córdoba, fabricaba, junto con Talha el eslavo, 12.000 arcos árabes y turcos al año, en talleres de Madinat al-Zahara. La producción de flechas, según el mismo autor, no bajaba de 12.000 mensuales. La prestigiosa maestría andaluza se vio siempre renovada y actualizada por artesanos y herreros procedentes de Irak, Persia y la India. Esto ocurre sobre todo a partir del reinado de Abd al-Rahman II, quien fomentó la industria artesanal del acero en al-Andalus, sobre todo en Córdoba y Toledo. Los herreros andalusíes fabricaban refinadas armas blancas que exportaban a través de un comercio ya muy activo desde el siglo IX, como describe el geógrafo egipcio Ibn Jurdadhbeh, que murió hacia el 885. A mediados del siglo XI, el emir Yusuf ben Taxufin regala a su primo hermano, el emir Abu Bakr ibn Ibrahim (Abubéker o Búcar en los cantares de gesta), 50 espadas tizonas, 20 con empuñadura de oro y 30 con empuñadura de plata, fabricadas en al-Andalus.

No se sabe cómo llegó uno de estos tizones, típicos de las forjas y talleres andalusíes, a manos del Cid. Lo que es seguro es que no pudo matar a Búcar (como leemos en el *Cantar de Mio Cid*), ya que éste le sobrevivirá bastantes años. No hay base sólida para atribuir al burgalés la hoja de acero aquí descrita, un tizón de los talleres de al-Andalus. Pero de nuestra investigación sí se infiere que se trata de un óptimo acero del siglo XI. Y parece razonable pensar que, si no hubiese pertenecido a un noble o un guerrero destacado, esta hoja acerada, a la que se despojó de su rica empuñadura andalusí y se la hirió gravemente con las inscripciones renacentistas, nunca hubiese llegado hasta nosotros.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL CID. Richard Fletcher. Editorial Nerea; Madrid, 1989.

POEMA DE MIO CID. Anónimo. Edición de Colin Smith. Ediciones Altaya S.A. Barcelona. 1993.

METALLOGRAPHIC STUDY OF THE STEEL BLADE OF THE SWORD TIZONA. Antonio J. Criado *et al.* en *Practical Metallography*, vol. 37, n.º 7; 2000.

Circuitos nerviosos de la sexualidad masculina

Irwin Goldstein, John Bancroft, François Giuliano, Jeremy P. W. Heaton, Ronald W. Lewis, Tom F. Lue, Kevin E. McKenna, Harin Padma-Nathan, Raymond Rosen, Benjamin D. Sachs, R. Taylor Segraves y William D. Steers

Muchos varones piensan del pene lo mismo que sentenciara Leonardo da Vinci hace quinientos años. Para esta figura eximia del arte, la invención e investigación del Renacimiento, el órgano viril poseía voluntad propia. Así escribió: "El pene no obedece las órdenes de su dueño, que intenta erguirlo o encogerlo a voluntad; por sí mismo se vigoriza mientras duerme su señor. Con un poco de imaginación podría incluso afirmarse que posee mente propia."

Da Vinci diseccionó penes de ejecutados en la horca. Aunque acertó en reparar que el miembro se llena de sangre durante la erección, erró al atribuirle voluntad. Sabemos hoy que, lejos de tener mente propia, se halla bajo el control absoluto del sistema nervioso central, es decir, del cerebro y la médula espinal. Tal como ha comprobado uno de los coautores (Steers), las alteraciones sufridas en la red que conecta el pene y el sistema nervioso central traen consigo problemas de erección.

En los últimos decenios se ha replanteado este dominio de la urología. Merced a los avances en biología molecular, se comprenden mejor los procesos internos del pene que conducen a su erección y detumescencia, o vuelta al estado de flaccidez. Se han empezado a explorar los mecanismos cerebrales y medulares del control de estas y otras funciones sexuales. Y si bien se trata sólo de unos primeros pasos, se adivinan ya nuevas terapias para los millones de hombres que padecen disfunciones. Asimismo, esperamos un beneficio colateral para las mujeres. Aunque la investigación ginecológica va muy por detrás, comienzan a evidenciarse paralelismos y diferencias sorprendentes en la función sexual del varón y la mujer.

La erección comprende una sucesión de eventos orquestada con suma precisión en la que el sistema nervioso central lleva la batuta. No abandona la dirección ni siquiera aunque el pene esté en reposo; si el hombre no se halla sexualmente excitado, ciertas partes del sistema nervioso simpático limitan el flujo sanguíneo hacia el miembro, manteniéndolo fláccido. El sistema nervioso simpático es una de las dos ramas del sistema nervioso autónomo, y éste, fracción del sistema nervioso central que controla la presión sanguínea, el ritmo cardíaco y demás respuestas internas "automáticas".

Equilibrio dinámico

En el interior del pene, y a lo largo del sistema nervioso, la respuesta sexual se debe a un equilibrio dinámico entre fuerzas excitadoras e inhibidoras. Si el sistema nervioso simpático tiende a inhibir las erecciones, el sistema parasimpático —la otra rama del sistema nervioso autónomo— constituirá una de las varias vías excitadoras. Las señales excitadoras se inician en el cerebro, instadas quizá por un olor, por la visión o memoria de una mujer seductora o por autoestimulación física.

Con independencia del origen de las señales, responden los nervios excitadores peneanos liberando neurotransmisores proeréctiles; entre ellos, óxido nítrico y acetilcolina. Estos mensajeros químicos relajan los músculos de las arterias peneanas, lo que facilita un mayor aflujo de sangre que va rellenando las cámaras esponjosas del interior del órgano. En su expansión, las cámaras comprimen las venas encargadas de drenar sangre del pene. La presión oprime las venas hasta dejarlas casi ocluidas; atrapan, pues, la sangre dentro de las cámaras y provocan la erección. (El fármaco Viagra —sildenafilo— enlentece el metabolismo de uno de los compuestos químicos que mantiene los músculos de las arterias del pene relajados, y de esta manera retiene la sangre en éste.)

Durante la erección, el miembro no se limita a recibir señales nerviosas; las envía, a su vez, también a la médula espinal y el cerebro. El pene posee una densidad supranormal de receptores táctiles especializados; cuando éstos se estimulan, sus señales van a la médula espinal y al cerebro, donde actúan sobre vías nerviosas de tales centros superiores. (El pene no "pensará", pero mantiene al cerebro y a la médula espinal al tanto de sus sensaciones.) Tras el clímax o un enfriamiento de la excitación, decae en seguida la erección. El sistema nervioso simpático restringe de nuevo el flujo sanguíneo al interior del pene, que vuelve a su estado blando.

El estrés o la exposición al frío —en definitiva, las circunstancias que aumentan la actividad del sistema nervioso simpático— pueden inducir una retracción transitoria. A la inversa, la desconexión de la actividad del sistema nervioso simpático intensifica las erecciones. Lo comprobamos en las erecciones nocturnas. Suelen darse en pleno sueño REM (movimiento ocular rápido), la fase en que se sueña. Durante el mismo, las neuronas simpáticas se hallan inactivas en el *locus coeruleus*, un área específica del tallo, siendo éste la parte del cerebro que conecta con la médula espinal.

De acuerdo con cierta hipótesis, cuando ese centro cerebral simpático se encuentra inactivo, predominan las vías proeréctiles, permitiendo así las erecciones nocturnas. Solemos referirnos a tales erecciones como "mecanismos de recarga de baterías", pues, al aumentar el flujo sanguíneo, aportan oxígeno nuevo para vigorizar el órgano. (En las mujeres se dan

1. HERMA GRIEGA, o busto con estípite, del 510 a.C., que representa la conexión entre el cerebro y el pene, que desconcertó a muchos en el pasado y ahora es objeto de intensa investigación.



también episodios de excitación nocturna. De hecho, experimentan congestión labial, vaginal y clitoral cuatro o cinco veces por noche, coincidiendo con cada episodio de sueño REM.)

Las erecciones reflejas se generan por entero en la médula espinal. A la manera del dedo que entra en contacto con una superficie comburente y provoca la retirada inmediata de la mano, la estimulación física del pene puede desencadenar un reflejo espinal de erección en ciertas circunstancias. Para perpetuarnos como especie, la reproducción ha adquirido tal importancia, que la capacidad de generar una erección se halla inscrita en una trama de circuitos nerviosos cercana a la base de la médula espinal del varón.

En humanos, la mayoría de los datos relativos a este hallazgo se han obtenido del examen de soldados con lesiones en la médula espinal, en particular de excombatientes heridos en la Segunda Guerra Mundial. Hasta entonces se suponía que las lesiones medulares inducían impotencia y esterilidad absolutas y permanentes. Un error comprensible, por otro lado. La médula espinal es la autopista de la información del sistema nervioso; por ella el estímulo nervioso va y vuelve del cerebro y los nervios periféricos. Si la médula espinal se daña, la circulación de impulsos nerviosos puede interrumpirse de innumerables maneras, en función del lugar y extensión del mal.

Pero, según describiera ya en 1949 Herbert Talbot en un estudio clásico, los varones con lesiones medulares graves o totales suelen seguir teniendo erecciones. Examinó doscientos hombres con paraplejía; las dos terceras partes tenían erecciones, y algunos podían copular y llegar al orgasmo. Aunque las heridas de la guerra los habían dejado paralíticos e incapaces de controlar funciones corporales básicas, habían respetado en general dicha función.

Estas observaciones —y estudios realizados en animales de laboratorio desde finales del siglo XIX— llevaron al descubrimiento de la existencia de un "centro generador de erecciones", alojado en los segmentos sacros de la médula espinal (por encima del final de la cola de caballo de la médula, entre las vértebras S3 y T12). La estimulación física del pene envía señales sensoriales, pasando por el nervio pudendo, a este centro de erección. Las señales entrantes activan las interneuronas, células conectoras que estimulan entonces neuronas parasimpáticas cercanas. Estas últimas envían señales desde la porción sacra de la médula espinal hacia los vasos sanguíneos del pene para inducir la erección. Mientras este arco reflejo persista intacto, la erección es posible.

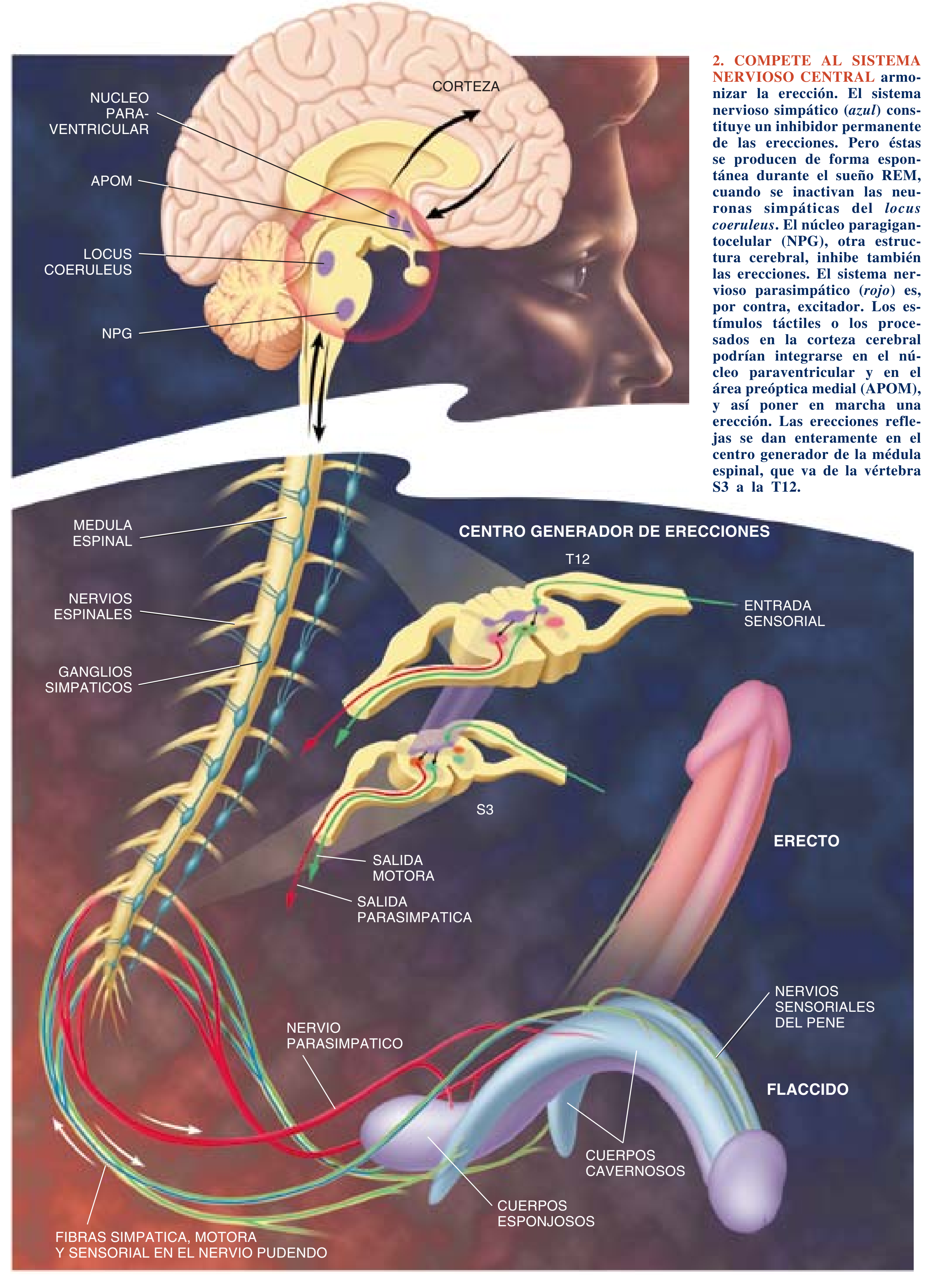
Los frenos cerebrales

Los estudios de varones y de animales de laboratorio con lesiones medulares se han anotado otro hallazgo sorprendente: cuando el cerebro se halla desconectado del centro generador de erecciones de la médula espinal, éstas ocurren más a menudo y con una estimulación táctil menor de la necesaria antes de la lesión. A este respecto, otro de los coautores (Sachs) observó en 1979 que la sección transversal de la médula espinal en ratas decuplicaba el número de erecciones y reducía en un 94 por ciento el tiempo que los roedores precisaban para llegar a la erección.

Daba la impresión de que la desconexión del cerebro con el resto del cuerpo eliminaba cierto control inhibidor sobre las erecciones. Impresión que respondió a la realidad. En 1990 McKenna y Lesley Marson identificaron el centro cerebral que reprime las erecciones mediadas por la médula. Estos fisiólogos de la Universidad del Noroeste hallaron que el núcleo paragigantocelular (NPG), un grupo de neuronas del rombencéfalo, se encargaba de dicha inhibición central. (El rombencéfalo forma parte del cerebro primitivo, en términos evolutivos, que controla la presión sanguínea y el ritmo cardíaco, funciones básicas.) Cuando McKenna y Marson destruyeron el NPG del cerebro de una rata macho, desapareció la inhibición y provocó erecciones más frecuentes e intensas.

En su haber apuntaron otro descubrimiento importante acerca de la función que cumple el cerebro en la supresión de las erecciones: las neuronas del NPG extendían la mayoría de sus axones a las neuronas de la médula espinal inferior generadoras de erecciones. Allí, las terminaciones nerviosas del NPG liberaban serotonina, un neurotransmisor químico que inhibe las erecciones mediante la oposición a los efectos de los neurotransmisores proeréctiles.

Este descubrimiento podría acarrear consecuencias de interés para los millones de varones y mujeres que se medican con fármacos potenciadores de la neurotransmisión mediada por



2. COMPETE AL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL armonizar la erección. El sistema nervioso simpático (*azul*) constituye un inhibidor permanente de las erecciones. Pero éstas se producen de forma espontánea durante el sueño REM, cuando se inactivan las neuronas simpáticas del *locus coeruleus*. El núcleo paragigantocelular (NPG), otra estructura cerebral, inhibe también las erecciones. El sistema nervioso parasimpático (*rojo*) es, por contra, excitador. Los estímulos táctiles o los procesados en la corteza cerebral podrían integrarse en el núcleo paraventricular y en el área preóptica medial (APOM), y así poner en marcha una erección. Las erecciones reflejas se dan enteramente en el centro generador de la médula espinal, que va de la vértebra S3 a la T12.

IRWIN GOLDSTEIN, urólogo de la Universidad de Boston, forma parte del Equipo de Investigación de los Mecanismos Centrales de la Disfunción Eréctil, creado en 1998, y al que pertenecen los demás firmantes del artículo. Bancroft trabaja en la Universidad de Indiana, Giuliano en la del Sur de París, Heaton en la Queen´s de Ontario, Lewis en la de Georgia, Lue en la de California en San Francisco, McKenna en la del Noroeste, Padma-Nathan en la del Sur de California, Rosen en la Robert Wood Johnson, Sachs en la de Connecticut, Segraves en la Case Western Reserve y Steers en la de Virginia. Todos los autores son consejeros o investigan (si no lo han hecho en el pasado) para Abbott, Eli Lilly, Merck, Pfizer, TAP u otros laboratorios farmacéuticos. Sachs posee acciones de Abbott; Heaton participa en varias patentes en apomorfina.

la serotonina, indicados para el tratamiento de la depresión y otros problemas de salud mental. Prozac (fluoxetina) y Seroxat (paroxetina), que pertenecen a un grupo de fármacos de prescripción general denominados inhibidores selectivos de recaptación de serotonina (ISRS), actúan en parte incrementando los niveles de serotonina en el cerebro. Estos fármacos suelen ocasionar disfunción sexual como efecto secundario indeseable: eyaculación retardada o empecida en los varones y, en mujeres, falta de apetito sexual y dificultad en llegar al orgasmo.

El estudio realizado por el equipo de McKenna aporta una explicación sobre la causa de ese efecto secundario: al aumentar la serotonina en el sistema nervioso central, los ISRS, podrían activar los frenos cerebrales de la erección, la eyaculación y otras funciones sexuales.

Mas, según lo habitual en medicina, un efecto secundario en unos se convierte en terapia de otros. Se ha observado que las propiedades inhibidoras de los ISRS resultan beneficas para eyaculadores precoces, que llegan al orgasmo antes de la penetración vaginal o a los pocos segundos. Los ISRS se muestran eficaces retardadores del orgasmo, por la presumible razón de que aumentan la inhibición central. Aunque se requiere una investigación más exhaustiva, los ISRS constituyen también una esperanza en el tratamiento de trastornos sexuales asociados con impulsos sexuales extremados o desordenados, como las parafilias, una de cuyas manifestaciones es la pedofilia.

Teniendo en cuenta que el sexo mueve el mundo, o al menos nos mantiene en el planeta, no acaba de entenderse la evolución de los controles inhibidores. Alguna hipótesis se ha esbozado. En opinión de Bancroft, uno de los firmantes del artículo, esta inhibición central constituye una adaptación para la mayoría de los hombres, pues les mantiene lejos de los problemas que se derivarían de una persecución excesiva o arriesgada de placer sexual. Con los frenos internos se evitan, además, eyaculaciones repetidas durante una relación sexual, que podrían disminuir la reserva de esperma y reducir la fecundidad.

Igual que ocurre con muchos placeres de la vida, la erección puede trocarse en exceso si dura demasiado. Si se prolonga más de cuatro horas —un fenómeno que puede darse en hombres con anemia falciforme y en los que toman ciertos fármacos—, necesita atención médica. Esta alteración, denominada priapismo, retiene la sangre en el interior del pene erecto y evoluciona en lesión permanente si se demora el tratamiento: si no entra sangre recién oxigenada, puede aparecer inanición hística.

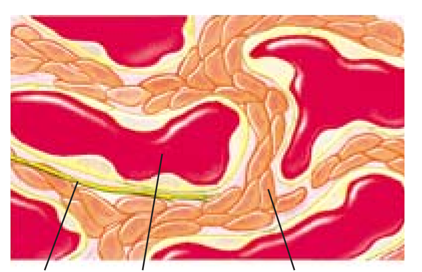
Pese a los beneficios de la inhibición central para la mayoría de los hombres, Bancroft cree que puede causar problemas en caso de ser demasiado fuerte o demasiado débil. Un control inhibidor central desmesurado —por niveles cerebrales de serotonina altísimos— puede comportar una disfunción sexual. Por contra, una inhibición central ínfima hace al sujeto más proclive a comportamientos de riesgo con menosprecio del peligro de enfermedades venéreas y otras en su búsqueda de satisfacción sexual.

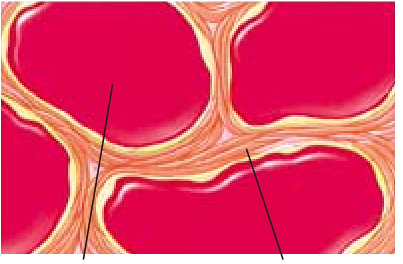
En el interior del cerebro

En la respuesta sexual masculina intervienen regiones muy dispares del cerebro, desde centros del rombencéfalo, que regula funciones corporales básicas, hasta áreas de la corteza cerebral, el órgano vinculado al pensamiento abstracto. Por lo que sabemos, existe una notable interconexión entre las zonas implicadas. El control cerebral de la función sexual actúa, a nuestro parecer, como una red unificada, no como una sucesión de puntos que transmiten por etapas. Dicho de otro modo, el control de las erecciones no estaría organizado en una cadena de centros de mando estrictamente vinculados, sino que se hallaría distribuido por múltiples áreas del cerebro y la médula espinal. Por eso, aunque una herida o una enfermedad destruya una o varias regiones seguirá intacta la función eréctil.

Una de las regiones cerebrales que regula el comportamiento sexual es el hipotálamo, estructura que cumple una función vital en la unificación de los sistemas nervioso y endocrino, u hormonal. El hipotálamo participa en el control de determinadas conductas básicas, así la agresividad y el comer; dentro del mismo, el área preóptica medial o APOM parece ejercer una intervención destacada en la función sexual, por cuyo motivo es objeto ahora de intensa investigación.

El grupo encabezado por Giuliano, también coautor, ha demostrado que la estimulación eléctrica o química





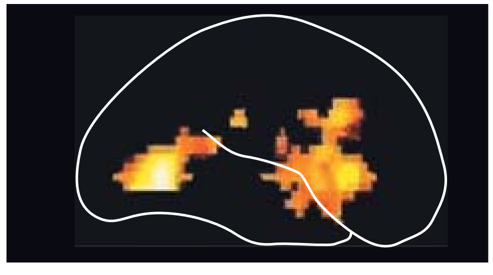
3. LA CONGESTION comienza cuando los nervios liberan transmisores que se difunden por las células del músculo liso alrededor de las arterias peneanas, lo que induce la distensión de las células contraídas y la irrigación sanguínea del interior (*superior*). Con la relajación, los músculos se alargan y comprimen las venas que vacían de sangre el pene. La sangre queda atrapada en los sinusoides —las cámaras entre las células musculares— y se promueve la erección (*inferior*).

del APOM provoca erecciones en las ratas. Todo apunta a que el APOM integra estímulos de varias áreas del cerebro, y ayuda a organizar y dirigir los patrones complejos de la conducta sexual. Algunos defienden la implicación del APOM en el reconocimiento de la pareja sexual.

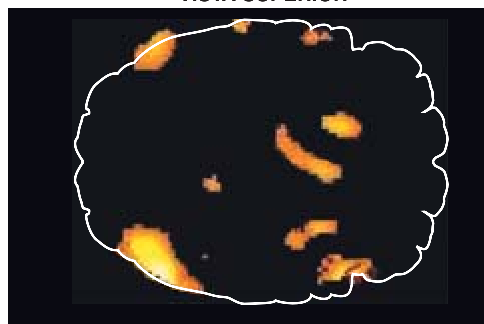
En el hipotálamo distinguimos también el núcleo paraventricular, otro grupo de neuronas comprometido con la función sexual masculina. Igual que el APOM, este núcleo es un centro de procesamiento que envía y recibe mensajes desde diferentes partes del cerebro y la médula espinal. El núcleo paraventricular libera, durante la excitación sexual, oxitocina, una hormona que estimula la secreción de leche de las lactantes y la contracción uterina durante el parto. Además, en muchas especies, la oxitocina es mensajero químico del "amor", pues promueve el apareamiento y las relaciones sociales. Pero resulta ser también un neurotransmisor cerebral que ejerce un potente efecto proeréctil en los varones. Lo mismo que otros neurotransmisores, la hormona se engarza a neuronas diana y regula la transmisión de los impulsos nerviosos. En este caso, la oxitocina activa vías nerviosas excitadoras que van del centro generador de erecciones de la médula al pene.

Mucho menos conocidos son los centros cerebrales superiores implicados en la respuesta sexual masculina. Pese a todo, los escasos estudios realizados han proporcionado resultados sorprendentes. Serge Stoleru, del Inserm francés, ha recurrido a la tomografía por emisión de positrones (TEP) para observar qué partes de la corteza cerebral se activan durante la excitación sexual. Comparó los escáneres TEP de un grupo de varones asistentes a tres tipos de películas: de sexo explícito, cómicas y carentes de emotividad o neutras (un documental sobre el Amazonas). Stoleru halló que, en los excitados, se activaban partes específicas de la corteza cerebral, incluidas ciertas regiones asociadas con las experiencias emocionales y el control del sistema nervioso autónomo.

Se ha abordado, a su vez, la intervención de la memoria y el aprendizaje, funciones cerebrales superiores, en el control de las erecciones. Rosen, signatario del artículo, demostró la posibilidad de provocar a voluntad una erección mediante imágenes mentales o claves no sexuales. Se adiestró a un grupo de varones para que, a cambio de una gratificación económica, se autoexcitaran sirviéndose de la mente y la fantasía. La capacidad del cerebro para asociar la excitación sexual y el orgasmo con determinadas claves nos ayuda a entender por qué tantos fetiches —zapatos de tacones altos, látigos de cuero y lencería— acentúan la excitación sexual.





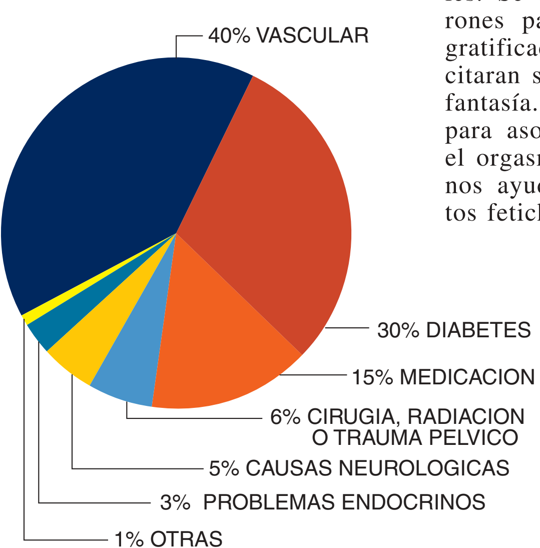


4. TOPOLOGIA DE LA EXCITACION, obtenida mediante TEP en varones asistentes a películas de sexo explícito. Aunque se está en los inicios de la investigación de la organización sexual del cerebro superior, estos escáneres demuestran la implicación de varias áreas de la corteza cerebral.

Cuando las cosas van mal

Un conocimiento más profundo del papel que desempeña el sistema nervioso central en el control de la erección y funciones asociadas sentará las bases de nuevas terapias. La disfunción eréctil, incapacidad de alcanzar o mantener una erección satisfactoria para la realización del acto sexual, es un problema sanitario frecuente. De acuerdo con cierto estudio realizado en el área de Boston, un 40 por ciento de los varones mayores de cuarenta años y un 70 por ciento de los septuagenarios padecen disfunción eréctil en algún grado. Puesto que la población mundial envejece, el número de varones afectados se duplicará de lejos en los próximos 25 años, superando la cifra de 330 millones de hombres.

Siempre que el estímulo nervioso no puede llegar al pene, aparece inevitable un problema de erección. Disfunción que puede ser también secuela aciaga de la extirpación quirúrgica de la glándula prostática en el tratamiento de un cáncer; esta intervención puede dañar los nervios del pene. La diabetes conduce, asimismo, al deterioro de nervios y vasos sanguíneos del miembro. Y



5. LA DISFUNCION ERECTIL tiene muchas causas, que van desde el estrés y otras circunstancias psicológicas a factores fisiológicos. El gráfico ilustra las causas físicas principales de la disfunción y pone de manifiesto que los problemas vasculares son la base de numerosos casos.

pueden provocar problemas de esta índole las lesiones de la médula espinal, enfermedad de Parkinson, esclerosis múltiple y accidente cerebrovascular. Sin olvidar que el humor y el bienestar mental afectan al flujo de mensajes nerviosos al pene, por lo que no debe extrañarnos que el estrés, la depresión, la ansiedad o el enfado planteen sus propios obstáculos.

Se trabaja en el diseño de medicinas que actúen sobre el sistema nervioso central. La apomorfina será presumiblemente el primer fármaco de una nueva hornada cuya acción se desarrolle en el cerebro y no en el pene, a diferencia de Viagra. La apomorfina —registrada en Estados Unidos bajo el nombre Uprima— remeda al neurotransmisor dopamina y potencia las erecciones mediante el engarce a receptores específicos en neuronas del núcleo paraventricular y del APOM; ponen, pues, en funcionamiento vías proeréctiles. Se halla ahora en fase de análisis por la Administración para el control de Fármacos y Alimentos de Estados Unidos (FDA) y se espera su pronta aprobación.

Pese a que la apomorfina se ha venido empleando desde hace más de un siglo —para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson y otras—, hasta mediados de los años ochenta no comenzó a investigarse su aplicación en la disfunción eréctil. Participaron en ese empeño los coautores Taylor Segraves y Heaton. Desde entonces, se han realizado ensayos clínicos en más de 3000 hombres, con resultados positivos en diversos tipos de disfunción.

Pero tampoco la apomorfina queda exenta de efectos secundarios nocivos. Si Viagra, el fármaco habitual contra la disfunción eréctil, produce dolores de cabeza, congestión nasal y enrojecimiento facial, la apomorfina provoca náuseas en las primeras dosis. Es de prever un tratamiento futuro más eficaz merced a la combinación de la apomorfina con terapias que actúen directamente en el pene.

El sexo y los sexos

Hasta hace poco, la investigación se centraba en el varón. Pero las cosas están cambiando para bien y gana fuerza el convencimiento de que la disfunción sexual es fenómeno común, mejorable, en ambos sexos. La verdad es que un rastreo de más de 3000 norteamericanos evidenció que el número de mujeres con problemas sexuales superaba el de varones: un 43 por ciento frente a un 31 por ciento.

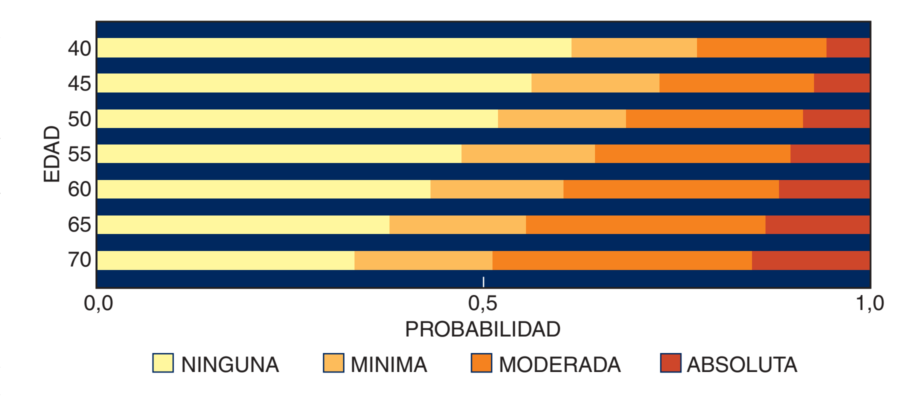
El laboratorio de Goldstein, autor principal del artículo, dirige un ensayo clínico para determinar si la apomorfina puede potenciar la excitación sexual en mujeres con disfunciones. Trabaja también en el rendimiento del "dispositivo de terapia clitoral-EROS", aprobado por la FDA; se emplea para proporcionar una suave succión al clítoris e inducir así su congestión. Aviva la sensación sexual y facilita la lubricación, el orgasmo y el placer.

A través de esta investigación se advierten ciertos paralelismos en el control que ejerce el sistema nervioso central sobre la excitación, el orgasmo y varias funciones sexuales de varones y mujeres. De entrada, ambos sexos experimentan respuestas de excitación nocturna y son vulnerables a la disfunción inducida por ISRS.

Por supuesto hay notables diferencias; por ejemplo, en el período refractario postorgásmico, el lapso tras un orgasmo antes de otro episodio de excitación. Las mujeres pueden tener múltiples orgasmos y carecen, por tanto, de período refractario; no así la mayoría de los varones, cuyo período refractario dura de varios minutos a muchas horas.

Hemos recorrido un largo camino desde que da Vinci descubrió que el pene se llena de sangre —no de aire o de "espíritus animales"— durante la erección. Los últimos diez años han revolucionado no sólo la investigación en la erección sino también la actitud social ante la salud sexual. Hace escaso tiempo apenas se prestaba atención médica a la disfunción eréctil.

Pero ahora se habla de manera más abierta sobre esta y otras alteraciones. Con la apreciación de la importancia de la salud sexual y la disponibilidad de tratamientos más eficaces, millones de hombres se medican. Se divisa un horizonte próximo con una gama más amplia de terapias para varones y mujeres. Con nuestro creciente discernimiento sobre el papel que ejerce el cerebro en el control de la sexualidad, nos acercamos a una visión más completa del bienestar sexual, donde se integran la mente y el cuerpo.



6. LA IMPOTENCIA aumenta con la edad, según varios estudios. Dentro de 25 años, dado el envejecimiento de la población mundial, la alteración podría afectar a más de 330 millones de varones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMPOTENCE AND ITS MEDICAL AND PSYCHOLOGICAL CORRELATES: RESULTS OF THE MASSACHUSETTS MALE AGING STUDY. H. A. Feldman et al. en *Journal of Urology*, vol. 151, n.º 1, páginas 54-61; enero de 1994.

NEURAL CONTROL OF PENILE ERECTION. F. Giuliano, O. Rampin, G. Benoit y A. Jardin en *Urology Clinics of North America*, vol. 22, n.º 4, páginas 747-766; noviembre de 1995.

THE BRAIN IS THE MASTER ORGAN IN SEXUAL FUNCTION: CENTRAL NERVOUS SYSTEM CONTROL OF MALE AND FEMALE SEXUAL FUNCTION. K. McKenna en *International Journal of Impotence Research*, vol. 11, suplemento 1, páginas 548-555; 1999.

SEXUAL DYSFUNCTION IN THE UNITED STATES: PREVALENCE AND PREDICTORS. E. O. Laumann, A. Paik y R. C. Rosen en *Journal of the American Medical Association*, vol. 281, n.º 6, páginas 537-544; 10 de febrero de 1999.

Origen de la dieta moderna

¿Por qué se sirven los dulces al final de la comida? Los orígenes de la cocina occidental moderna hunden sus raíces en ideas que acerca de la dieta y la nutrición surgieron a mediados del siglo XVII

Rachel Laudan

De haber asistido en la Francia o la Inglaterra del siglo XVI a un banquete cortesano, la comida que allí se servía nos habría parecido extrañísima. Abundaban en aquellos menús los purés de arroz y pollo (manjar blanco), espesos y mezclados con leche de almendras, aderezados con azúcar y manteca de cerdo frita. El lechoncillo asado podía sazonarse con salsa de camelina, acompañamiento que constaba de jugo de uvas agraces espesado con miga de pan, pasas y almendras machacadas, salpimentado el conjunto con cinamomo y clavo. Otras ofertas podían consistir en habas cocidas con carne y aderezadas con menta molida o dulce de membrillo (que se hacía con azúcar o miel). Y, para regarlo todo, se escanciaría hipocrás, un vino tinto caliente y sazonado con jengibre, cinamomo, clavo y azúcar.

En cambio, apenas 100 años después, el menú nos resultaría ya tranquilizadoramente conocido. Habría sobre la mesa caldo de carne, ostras, anchoas y un pavo asado con su salsa. De acompañamiento se servirían setas cocinadas con nata y perejil, lechuga aliñada con aceite y vinagre, peras de agua, sorbete de limón y un espumoso vino blanco.

Con anterioridad al año 1650, las clases acomodadas tanto del mundo cristiano como del islámico, desde Delhi hasta Londres, compartían en buena medida la misma dieta: espesos purés, muchas especias, salsas dulces o agridulces, hortalizas cocidas y vinos calentados. Para condimentar los manjares se empleaba por doquier el azúcar. Pero, a mediados del siglo XVII, en la Europa del norte la dieta empezó a cambiar. En el nuevo régimen se restringió el uso de especias, se prepararon las salsas con mantequilla o aceite de oliva y se contó mucho más con las frutas frescas y con las verduras sin cocer. Los dulces sólo se sacaban al final de la pitanza.

¿Qué había ocurrido? No podemos atribuir el cambio a motivos económicos. Si para las clases superiores el dinero no era problema, ambos tipos de dieta estarían fuera del alcance de los pobres, quienes, hasta muy avanzado el siglo XIX, siguieron subsistiendo con sopas de nabo y gachas de cereales. Tampoco explican el cambio de dieta los nuevos productos alimenticios llegados de América. A excepción del pavo, los platos de los banquetes de entonces no dependieron del uso de ingredientes inéditos, sino de emplear de un modo nuevo los que desde hacía mucho eran ya conocidos. La clave de tamaña transformación de los hábitos alimentarios como fue la que se produjo entre los siglos XVI y XVII ha de buscarse, por contra, en la evolución de las ideas sobre la dieta y la nutrición, es decir, en la historia de la química y la medicina.

La medicina del siglo XVI

Comer alimentos saludables era importantísimo para la gente de épocas pasadas, puede que aún más que para la de hoy. Las actividades culinarias y dietéticas significaban mucho, al no disponer los médicos de numerosas opciones más. Para evitar el recurso a terapias tan desagradables como la purga o la sangría, los galenos controlaban con el mayor cuidado el comportamiento diario de sus pacientes, su estado emocional, por ejemplo, y cuánto tiempo dormían, qué ejercicio físico hacían y la salubridad del aire que respiraban. Pero sobre todo les prescribían la comida y la bebida que debían consumir. En cada palacio había un grupo de médicos bien instruidos en cuanto a fisiología de la digestión, propiedades nutritivas de los alimentos y características de la comida sana. Su ocupación principal consistía en aconsejar a sus opulentos patronos sobre la dieta adecuada.

La tarea de llevar a la práctica la teoría dietética, transformándola en platos apropiados para la mesa de los señores, les correspondía a los jefes de cocina o ‘mayordomos’. En el *Breviario de la salud*, un texto popular de medicina escrito en 1547, su autor, Andrew Boorde, anotaba que “un buen cocinero es ya medio médico”. Las ideas que acerca de los alimentos y la dieta tenían en común en el siglo XVI los cocineros, los médicos y sus patronos provenían de la antigüedad clásica. Formuladas primeramente hacia el 400 a.C. como parte de la colección de obras atribuidas a Hipócrates, aquellas ideas fueron sistematizadas, a comienzos del siglo II d.C., por Galeno, que ejerció en Roma. Tras el hundimiento de la civilización clásica, los eruditos islámicos fueron recogiendo aquellas nociones (junto con otras muchas teorías de la Antigüedad).

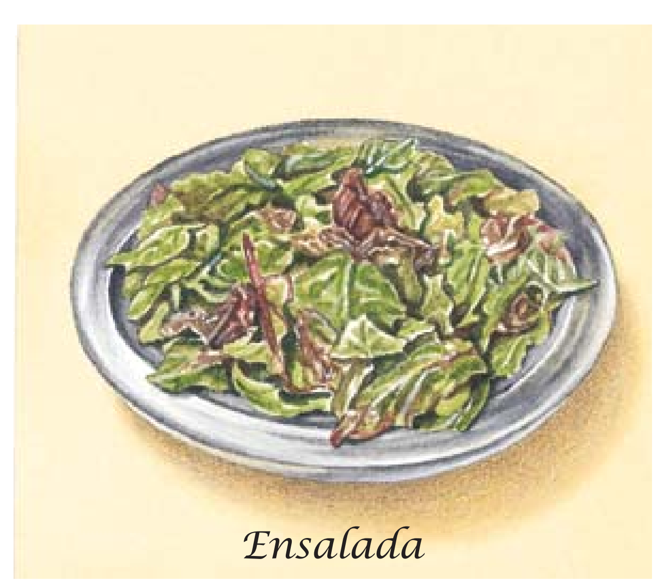
EN UN BANQUETE del siglo XVI podía haber un plato de puré de arroz con pollo (manjar blanco) acompañado de salseras con salsa de camelina (un revuelto de almendras machacadas, migas de pan y especias aliñado con jugo de uvas agraces) y, para beber, hipocrás, un vino tinto lleno de picantes especias y que se servía caliente. En cambio, los menús del siglo XVII serían ya más parecidos a los actuales: pavo asado, ensalada a la vinagreta y espumoso vino blanco.

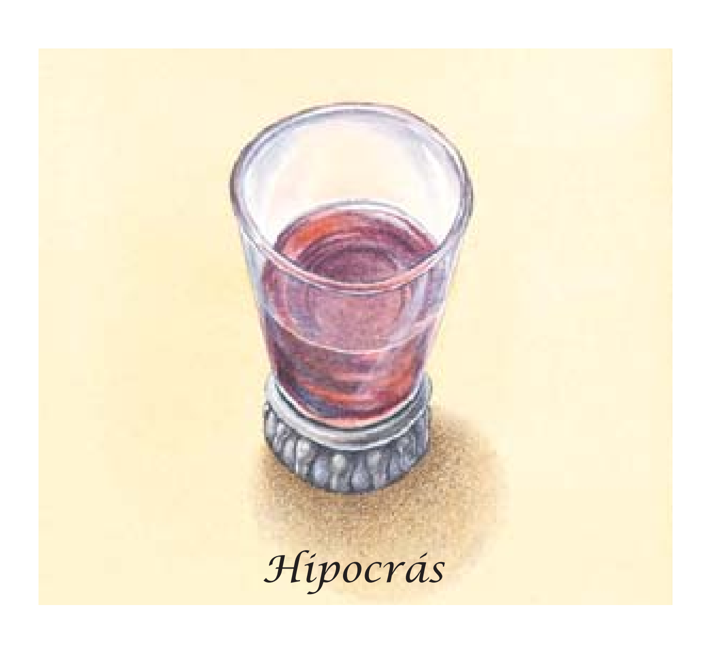
Antes de 1650 | *Después de 1650*


Puré de arroz y pollo

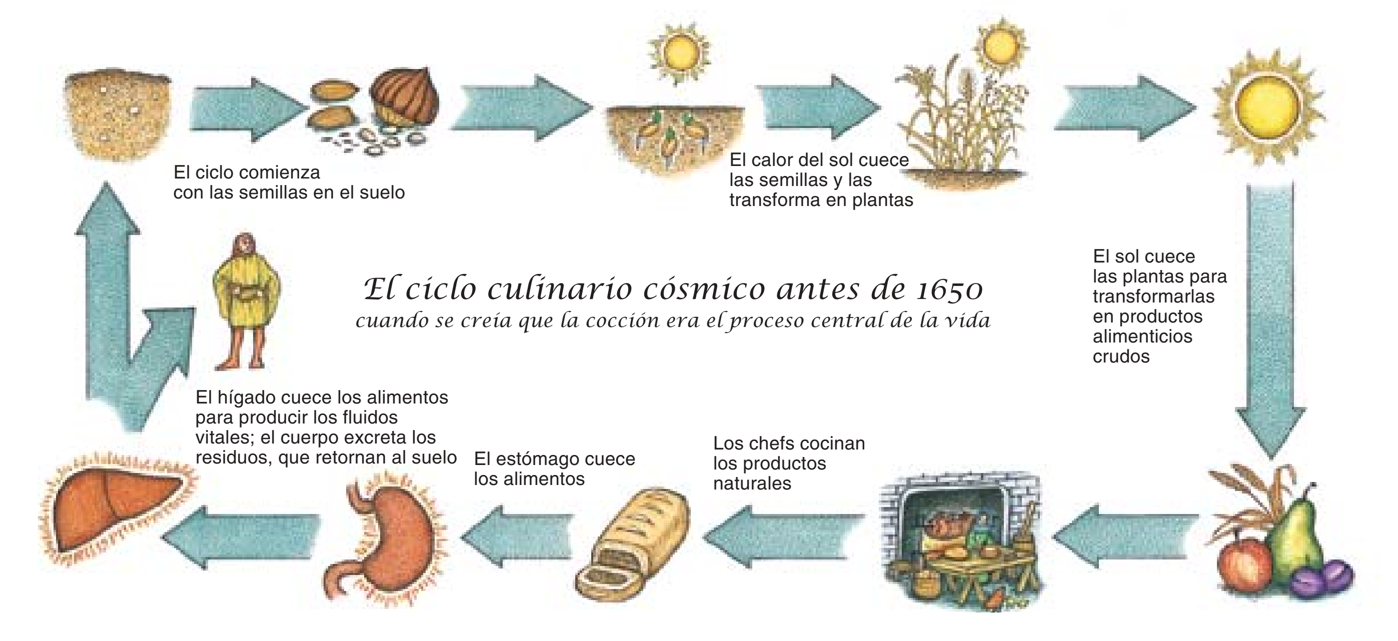

Pavo asado


Salsa de camelina


Ensalada


Hipocrás


Vino blanco espumoso

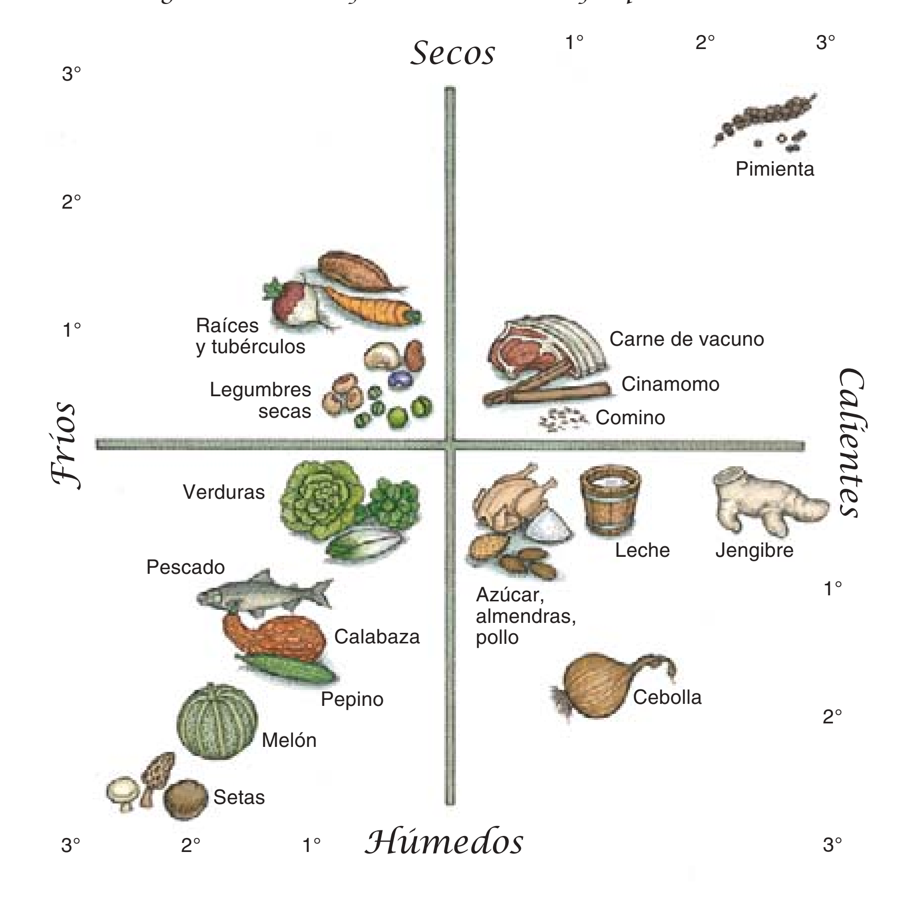


En el siglo XII se tradujeron en Europa al latín textos árabes fundamentales, que constituyeron la base de la enseñanza de la facultad de medicina de Montpellier y otras universidades. A finales del siglo XV, los humanistas empezaron a traducir manuscritos griegos recién descubiertos y a verter de nuevo textos ya conocidos. En estos documentos se basaron un sinnúmero de manuales populares y de centones de rimas mnemotécnicas. Recibieron especial acogida las variantes populares de un poema latino, el *Regimen Sanitatis Salernitanum*, compuesto según parece hacia finales del siglo XI, si bien seguía circulando todavía en el XVII. Decíase allí, entre otras cosas:

Melocotones, manzanas, peras,
leche, queso y salazones,
carnes de venado, liebre, cabra
y ternera:
son cosas que engendran bilis
negra y son enemigas
del enfermo

El saber dietético preponderante en el siglo XVI, como se lo presenta en los prontuarios mencionados, se fundaba en dos supuestos: primero, que el proceso de digestión de los alimentos era una cocción genuina. Esta metáfora del cocer estaba en el centro de todas las explicaciones de los sistemas vivos: las semillas se transformaban, por cocción, en plantas, y, al aparecer éstas en la superficie del suelo, el calor del sol las iba cociendo para que madurasen granos y frutos. Los humanos, recogiendo esos productos alimenticios, podían cocerlos más, cocinarlos para convertirlos en comida. Finalmente, el calor interno del cuerpo transformaba lo comido en sangre. Y lo indigesto se expelía en forma de heces. Los excrementos, junto con los restos en putrefacción de plantas y animales muertos, daban nuevo comienzo al ciclo vital.

El segundo supuesto acerca de la comida y la salud en tal escenario era que había que ajustar las comidas a una dieta apropiada para mantener en buen equilibrio los humores o fluidos corporales: sangre, flema, bilis amarilla y bilis negra. Estos humores correspondían a los cuatro elementos aristotélicos, a saber, aire, agua, fuego y tierra. La sangre, caliente y húmeda, correspondía al aire; la flema, fría y húmeda, al agua; la bilis amarilla, caliente y seca, se asemejaba al fuego; y la bilis negra, fría y seca, era afín a la tierra.



En teoría, el cuerpo humano era ligeramente cálido y húmedo, aunque en la práctica el equilibrio exacto variaba de un individuo a otro, según edad, sexo y región geográfica. Se consideraba a la gente mayor más fría y seca que los jóvenes; a las mujeres, más frías y secas que los varones; a los europeos meridionales, de sangre más caliente que sus vecinos del norte. El alimento perfecto, como el temperamento humano cabal, era ligeramente cálido y húmedo. Se salía al paso de las desviaciones de ese patrón con correcciones dietéticas benignas, que calentaban y humedecían a los más ancianos, aportaban sequedad a las mujeres, calmaban a los meridionales y estimulaban a los nórdicos.

El mayordomo debía seleccionar y preparar las comidas de modo que conviniesen al temperamento del comensal. Las propiedades de cada producto eran de común conocimiento: la pimienta, por ejemplo, era caliente y seca en tercer grado, y el vinagre era frío y húmedo en segundo grado. Entre las hortalizas, los nabos eran de naturaleza térrea (secos y fríos); mejor era dejarlos para los campesinos. Pero si los mayordomos decidieran servirlos, se asegurarían de cocerlos a fuego lento añadiéndoles así el calor y la humedad que les faltaban. En cambio, el cardo, el calabacín (hortaliza acuosa) y sobre todo las cebollas, como rezumaban humedad, tenían que freírse.

Otras comidas eran del todo inaceptables. Guy Patin, profesor de la Universidad de París y autor de un *Tratado de la Conservación de la Salud* publicado en 1632, aconsejaba no probar las setas, por ser frías y húmedas. También se excluían melones y otras frutas frescas, por ser muy acuosos y putrescibles. En líneas generales, el cocinar no sólo contribuía a conseguir el debido equilibrio culinario —hirviendo los alimentos secos y friendo o asando los húmedos—, sino que constituía también una suerte de parcial digestión previa, un proceso que facilitaba la asimilación de los alimentos por el cuerpo.

Según estas teorías médicas, el puré de arroz y pollo de nuestra mesa renacentista venía a ser la perfección del menú. El competente jefe de cocina había combinado el pollo, el arroz y la leche de almendras, todo ello ligeramente cálido y húmedo, coronando el conjunto con azúcar, también caliente y húmedo. Había asado el lechoncillo, de naturaleza húmeda.



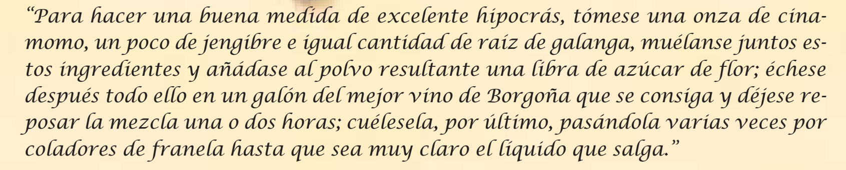
Recetas típicas anteriores al siglo XVII

Salsa de camelina

"Para hacer una excelente salsa de camelina: pélense unas almendras, macháqueselas hasta reducirlas a polvo y pásese éste por un tamiz; tómense luego uvas, canela, clavo y unas cuantas migas de pan y, junto todo ello y bien machacado, empápeselo con zumo de uvas agraces, con lo que quedará hecha la salsa."

Puré de arroz y pollo

"Picar lo más menudo que se pueda unas pechugas de pollo hervidas; lavar y secar bien el arroz y, una vez molido, cernerlo con cuidado; empápese luego la harina de arroz en leche de cabra, de oveja o de almendras y póngase el conjunto al fuego en una cazuela extremadamente limpia; cuando empiece a hervir, se le añadirán las pechugas picadas, azúcar blanca y manteca de cerdo frita; procúrese que no se ahúme todo y manténgaselo hirviendo a fuego lento hasta que la masa alcance el debido punto de espesor. Inmediatamente antes de sacarlo a la mesa, cúbrase con azúcar en grano o en polvo y con grosura de cerdo frita."



Hipocrás

"Para hacer una buena medida de excelente hipocrás, tómese una onza de cinamomo, un poco de jengibre e igual cantidad de raíz de galanga, muélanse juntos estos ingredientes y añádase al polvo resultante una libra de azúcar de flor; échese después todo ello en un galón del mejor vino de Borgoña que se consiga y déjese reposar la mezcla una o dos horas; cuélesela, por último, pasándola varias veces por coladores de franela hasta que sea muy claro el líquido que salga."

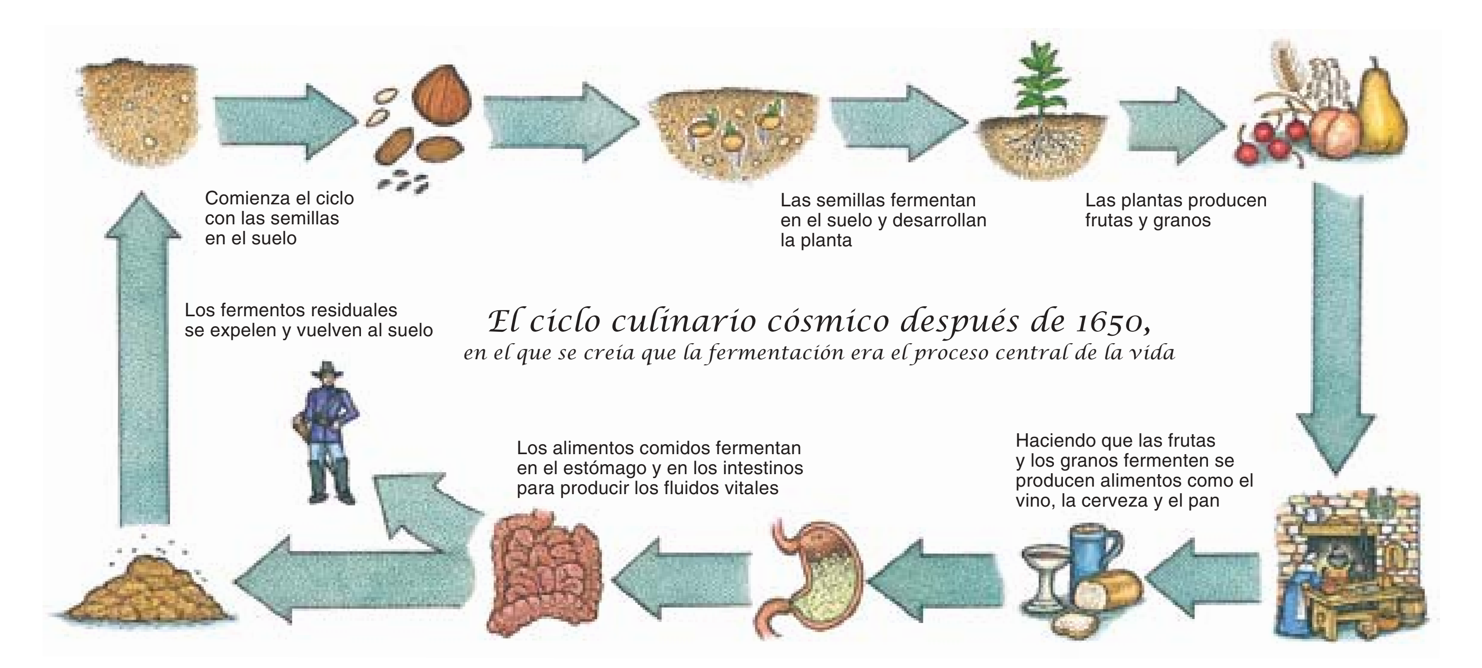
La salsa de camelina hacía que el frío y húmedo vinagre se equilibrara con el calor de las pasas y con las secas y cálidas especias. El mayordomo se cuidaba de que nunca se sirviesen uvas ni membrillos frescos, porque eran peligrosamente fríos y húmedos; los ofrecía secos o cocinados con azúcar añadida (como en el dulce de membrillo).

Los médicos consideraban que el vino bebido en la comida era un nutriente ideal, siempre y cuando no se cayera en el exceso. El *Libro del vino*, escrito hacia el año 1310, impreso el 1478 y atribuido a Arnau de Vilanova (eminente tratadista y médico del rey Jaime II de Aragón) sólo tiene alabanzas para su consumo: el beber vino, además de ser bueno para combatir las flatulencias y la infertilidad, "fortalece el cerebro y el vigor natural... ayudando a digerir los alimentos y produciendo buena sangre". Pero aun así, como el vino tinto tendía a ser por naturaleza frío y seco, los mayordomos antes de servirlo lo calentaban y le añadían azúcar y especias, convirtiéndolo en el famoso hipocrás. Con tales opciones a su disposición, los cortesanos del siglo XVI podían estar seguros de la salubridad de sus comidas.

La cocina del siglo XVII

Sin embargo, hacia mediados del siglo XVII empezaron a aparecer por las cortes palatinas del norte de Europa unos médicos cuyas convicciones eran muy distintas. Profesaban las ideas de Paracelso, un suizo itinerante que, por los veinte de la centuria precedente, se mofaba del galenismo imperante. Su apasionada personalidad y radicales creencias religiosas le granjearon una pésima reputación, por lo que pocos médicos se atrevían a declararse seguidores de sus directrices. Pero, reconocida o no, la vinculación era clara: estos médicos cortesanos sostenían, lo mismo que Paracelso, que la idea de un cósmico ciclo vital basado en la cocción era tan equivocada como la de los elementos aristotélicos, y, por tanto, debía revisarse.

Aunque los historiadores de la ciencia discuten todavía sobre las causas de este cambio de mentalidad, parece indudable el papel decisivo de la técnica de la destilación. Desde finales de la Edad Media, la práctica del destilar fue cobrando cada vez mayor importancia. Los químicos sometieron a la acción del calor sustancias naturales de diverso tipo, muchas de ellas comestibles, tales



El ciclo culinario cósmico después de 1650,
en el que se creía que la fermentación era el proceso central de la vida

como el hinojo, la nuez moscada y el clavo. Y observaron que, en cada caso, el material originario se separaba siempre en tres partes: un fluido volátil o "espirituoso", una sustancia oleosa y un residuo sólido.

Sacando las consecuencias de tales observaciones, los químicos propusieron tres nuevos elementos, en vez de los cuatro de Aristóteles: mercurio (la esencia de los fluidos vaporosos; sin relación con el elemento tóxico del mismo nombre), azufre (la esencia de las sustancias oleosas, que no debe tampoco confundirse con el elemento de igual nombre) y sal (la esencia de los sólidos, no restringida a la sal de mesa). En tal cuadro, la sal paracelsista determinaba el gusto y la consistencia de los alimentos. El mercurio era la fuente de olores y aromas. Al azufre, o al óleo, se debían las propiedades de humedad y edulcoración, y él unía también a los otros dos, normalmente antagónicos, elementos.

Los médicos de esta corriente creían que la digestión implicaba fermentación, no cocción. Empezaron a investigar de cerca ese proceso familiar y misterioso a un tiempo. Como la fermentación incluía un ligero calor y producía vapores, imitaba a la putrefacción, la destilación y la interacción entre ácidos y sales, si no era eso mismo. Los vapores, espíritus o aires (pronto serían apodados "gases" por Johannes Baptista van Helmont, un científico holandés) intrigaban a los químicos de la época, porque parecían ser la esencia misma de la sustancia a partir de la cual se originaban.

Varios médicos eminentes del siglo XVII defendieron esta nueva manera de entender la digestión, entre ellos van Helmont, Franciscus Sylvius, profesor de la Universidad de Leiden, y Thomas Willis, el médico más célebre de Inglaterra y miembro fundador de la Regia Sociedad de Londres. En el marco de la nueva teoría, la digestión comportaba la fermentación de los alimentos. Los jugos gástricos, considerados como ácidos y mordientes, actuaban sobre la ingesta para convertirla en un fluido blanco y lechoso, que después, en el tracto digestivo, se mezclaba con la alcalina bilis. La mezcla fermentaba y burbujeaba, produciendo una sustancia salina que el organismo transformaba en sangre y en otros fluidos.

Como sus predecesores del siglo XVI, estos médicos posteriores se imaginaban un cósmico ciclo vital que reflejaba su idea de la digestión. Las semillas se transformaban en plantas a resultas de los "fermentos de la tierra", según sostuvo John Evelyn, un avisado horticultor, ante la Regia Sociedad en 1675. Por fermentación se convertían los cereales y las uvas en pan, cerveza y vino, que luego el sistema digestivo sometía a ulterior fermentación. La putrefacción de las materias residuales reiniciaba un nuevo ciclo. "La putrefacción de los vegetales se parece mucho a la Digestión Animal", afirmaba John Arbuthnot, miembro de la Regia Sociedad y médico de la reina Ana, en un manual de divulgación sobre los alimentos muy famoso, publicado en 1732. El cosmos seguía interpretándose como una cocina, sólo que ahora equipada con alambiques y cubas de destiladores; el cuerpo humano poseía copias en miniatura de ese equipo.

Los cambios operados en la explicación del mecanismo de la digestión alertaron a los jefes de cocina. Los más inteligentes no perdieron la oportunidad de ganar prestigio inventando platos que fuesen saludables según los nuevos criterios, sin perder, por supuesto, un átomo de atracción. Introdujeron así en sus menús las ostras, las anchoas, las verduras crudas, las setas y las frutas frescas, alimentos que, por fermentar fácilmente, no requerían ninguna complicada elaboración previa para su digestión. Y a medida que los cocineros incorporaban a muchos de sus platos productos frescos, se fueron poniendo en boga la horticultura y los jardines botánicos. Hombres de ciencia y caballeros ilustrados se intercambiaban semillas, traducían libros de jardinería e instalaban invernaderos para disponer de verduras tiernas. Iniciaron el cultivo de champiñones sobre lechos de estiércol. En Inglaterra los ricos llegaron a poner sobre sus manteles las berenjenas, tenidas antaño por inconvenientes y desagradables.

Los primeros restaurantes

Las sustancias ricas en grasa, tales como la mantequilla, la manteca de cerdo y el aceite de oliva, todas ellas con la útil propiedad de que ligan bien los componentes de sal y mercurio, pasaron a ser la base de infinitas salsas. Se combinaban ingredientes que contenían el elemento salino, por ejemplo harina y sal de mesa, con otros ricos en mercurio, como vinagre, vino, licores y caldos de carne o de pescado. La primera receta de la salsa rubia ("roux"), una combinación de manteca de cerdo y harina de trigo con vino o caldo espeso que les daba un especial y muy delicado sabor, apareció en *Le Chef français*, ma-

nual de cocina escrito en 1651 por François Pierre de la Varenne. No tardaron en ponerse también de moda las ensaladas, que se aliñaban con diversas vinagretas y se acompañaban de *crudités* fácilmente digeribles. (Evelyn hizo mucha propaganda de la salsa vinagreta en su *Acetaria*: *A Discourse of Sallets*, obra publicada en 1699.)

A medida que la fruta, las finas hierbas y los vegetales en general fueron ocupando un puesto cada vez más prominente en las comidas, el azúcar, elogiado antes como una panacea, pasó a ser mal considerado por los yatroquímicos. Algunos abogaron por su supresión absoluta. "Bajo su blancura", avisaba en 1606 Joseph Duchesne, médico de Enrique IV de Francia, "el azúcar oculta una tremenda negrura" —ya se sabía entonces que ennegrece los dientes— y bajo su dulzura una fortísima acritud, tanta como la del *aqua fortis* [ácido nítrico]."

Con ello estaba de acuerdo Willis, quien había observado que los enfermos que padecían lo que con el tiempo se llamaría diabetes, tenían azúcar en la orina. "El azúcar, destilada por sí misma, produce un licor apenas inferior al *aqua fortis*... Por lo que es muy probable que, como el azúcar se mezcla a casi todo lo que comemos, con su uso diario se llegue a tenerla en tan alto grado que haga que la sangre y los humores se salen y agríen, originándose en consecuencia el escorbuto."

La moraleja estaba cantada: el azúcar era peligroso, quizás incluso venenoso. Tan drásticos avisos harían a buen seguro que los cocineros se abstuvieran de poner azúcar en los platos principales de las comidas, sin dejar a quienes iban destinadas éstas otra opción que tomárselas. Así, el azúcar se desplazó a la periferia del menú, sirviéndose sólo en postres que se preparaban en cocina aparte. El azúcar se convirtió en tema de un género especial de libros dedicados a exponer sus propiedades decorativas, no medicinales.

Los tres principios

por los que se clasificaba los alimentos a finales del siglo XVII



El principio "azufre"

suaviza los alimentos y liga los altos en sal y en mercurio (aceite, mantequilla, manteca)

El principio "sal"

da buen sabor (sal de mesa, harina)



El principio "mercurio"

volatiliza y gasifica los alimentos y les confiere su aroma (vinagre, vino, caldo de carne de vaca)

Los médicos consideraban medicinas provechosas las bebidas alcohólicas y otras esencias destiladas. Pero reputaban, igual que sus pacientes, que hasta del mejor aguardiente sólo convenía algún sorbo ocasional, por ser demasiado fuerte para el uso diario. Extractos menos enérgicos, realizados a partir de carnes concentradas por ebullición o fermentación, eran más fácilmente digeribles. A veces, la bondad concentrada de un alimento se evidenciaba en las deseables burbujas de gas que nutrían el cerebro. Las aguas minerales carbónicas se hicieron popularísimas en toda Europa a medida que se fueron explotando manantiales por doquier. En la mesa, el caliente y picante hipocrás cedió el puesto a los vinos fríos, incluso al espumoso champán, producido quizá por primera vez a finales del siglo XVII.

Los *chefs* preparaban el caldo de carne y pescado con "las partes musculosas de las piezas, que son las más nutritivas, las que dan el mejor jugo", y servían este saludable alimento en forma de caldo propiamente dicho o de gelatina. Los jugos de las carnes de animales terrestres eran más nutritivos que los de las de pescados y aves, y los más fortificantes de todos eran los de la carne de vacuno. En 1733, Vincent de la Chapelle, jefe de cocina francés que trabajaba en Inglaterra al servicio del conde de Chesterfield, incluyó en su libro *El cocinero moderno* varias recetas para condimentar el caldo de carne de vaca. Los hombres de negocios no tardaron mucho en ver que esta nueva manera de cocinar les brindaba la ocasión de establecer "restaurantes" para quienes no pudieran permitirse el lujo de tener cocineros a su servicio.

Con el tiempo, en Europa, la clase media emularía a la aristocracia desarrollando la afición no sólo a los restaurantes sino a toda la nueva cocina. Tales menús parecían ofrecer un cierto refinamiento en el gusto y un avance en sentido químico, pues sus platos representaban la forma más recomendable de comer. Como decían los autores del libro *Les dons de Comus* ['Los regalos de Como', dios de la comida], publicado en París en 1739: "La cocina moderna es una especie de química. La ciencia del cocinero consiste hoy en analizar, extractar y disponer la quintaesencia de los productos alimenticios, sacando de ellos ligeros y nutritivos jugos y mezclándolos y fusionándolos los unos con otros."

Esta nueva dieta se fue difundiendo gradualmente por Europa, llegando a todos los niveles de la escala social. Entre mediados y finales del siglo XIX se generalizó por los países europeos de habla inglesa y francesa, así como en los EE.UU., Canadá y Australia. Sin embargo otras regiones —por ejemplo el mundo islámico e Iberoamérica— permanecieron aisladas de la química derivada de Paracelso y no adoptaron ni la consiguiente teoría dietética ni la cocina que requería. (Los curris de la India y los moles de México se parecen a los guisos de la cocina norteuropea preparacélsica.)

La cocina occidental, nacida en el siglo XVII, sobreviviría largo tiempo

RACHEL LAUDAN es doctora en historia y filosofía de la ciencia por la Universidad de Londres, disciplina que ha enseñado en la Carnegie Mellon y en la de Pittsburgh, en el Instituto Politécnico de Virginia y en la Universidad de Hawai. Autora de *From Mineralogy to Geology: The Foundations of a Science 1650-1830*, prepara en México una historia de la dieta.

a la teoría dietética que la inspiró. Hacia finales del siglo XVIII, químicos y médicos se embarcaron en la investigación que conduciría a las teorías modernas sobre las funciones que en la bioquímica de la digestión desempeñan los hidratos de carbono, las calorías, las proteínas, las vitaminas y los minerales. Durante el siglo XIX y en las primeras décadas del XX, cuando se acometieron la mayoría de estos estudios, los especialistas en nutrición se centraron en idear una dieta barata y adecuada para los obreros de las fábricas, los soldados y las gentes de economía menos boyante. Mas el desplazamiento del punto de vista médico, del rico al pobre, no quitó el que los maestros cocineros, al elaborar sus platos para los pudientes, siguieran desarrollando la cocina occidental según las pautas establecidas en el siglo XVII.

Hoy día, cuando en Occidente casi todos pueden permitirse el lujo culinario reservado otrora a los ricos, se ha llegado a comprender que las bases dietéticas de esta cocina constituyen una mezcla de ventajas e inconvenientes. Pues aun siendo grande su proporción de frutas y verduras frescas, el que en nuestras dietas ocupe una posición central la grasa (por la importancia que se da en ellas a las carnes y a los guisos y salsas) es el factor responsable de las altas tasas de obesidad que se registran en la mayoría de los países desarrollados. Ante este inconveniente, todo el mundo, desde los médicos hasta los jefes de cocina, ha vuelto la atención hacia el viejo problema de cómo crear una nueva cocina cuyos platos sean deliciosos sin dejar de estar, a la vez, en línea con los más recientes descubrimientos de la fisiología y la nutrición.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FRENCH PARACELSIANS: THE CHEMICAL CHALLENGE TO MEDICAL AND SCIENTIFIC TRADITION IN EARLY MODERN FRANCE. Allen G. Debus. Cambridge University Press, 1991.

ACQUIRED TASTE: THE FRENCH ORIGINS OF MODERN COOKING. T. Sarah Peterson. Cornell University Press, 1994.

THE ART OF COOKERY IN THE MIDDLE AGES. Terrence Scully. Boydell Press, 1995.

Evolución del ozono troposférico

Observado por primera vez en 1952 en los Estados Unidos, el ozono troposférico, dañino para la salud humana y la vegetación, afecta hoy a los países mediterráneos, España incluida.

Federico Velázquez de Castro, Federico López Mateos y Emiliano Hernández Martín

Los orígenes de la contaminación atmosférica se remontan al advenimiento de la Revolución Industrial. El dióxido de azufre, el monóxido de carbono y las partículas procedentes de los procesos de combustión plantearon problemas locales —descritos ya por R. Smith en 1852— que con el avance de la mecanización fabril afectarían a zonas más extensas. Reciente es, sin embargo, la identificación de otros contaminantes; así, ciertos compuestos aromáticos, productos de combustión incompleta, radicales libres o contaminantes fotoquímicos, de los que el ozono es el más representativo.

1. TANTO LA INDUSTRIA COMO EL TRAFICO generan óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que, en presencia de abundante luz solar, darán lugar a la contaminación o *smog* fotoquímico. La neblina que la caracteriza contiene un amplio espectro de productos oxidantes de los que el ozono es el más representativo y puede ocasionar daños respiratorios en los seres humanos, reducción de la fotosíntesis en las plantas y oxidación de materiales que contienen dobles enlaces: caucho, algodón, celulosa, cuero, pinturas, plásticos...



El ozono comenzó a formarse hace 1500 millones de años. A él le debemos que la vida emergiera de las profundidades a la superficie de las aguas, para pasar luego a tierra firme. Desde entonces, el ozono estratosférico ha desempeñado una función protectora de los organismos sobre la Tierra al absorber la fracción más penetrante de la radiación ultravioleta.

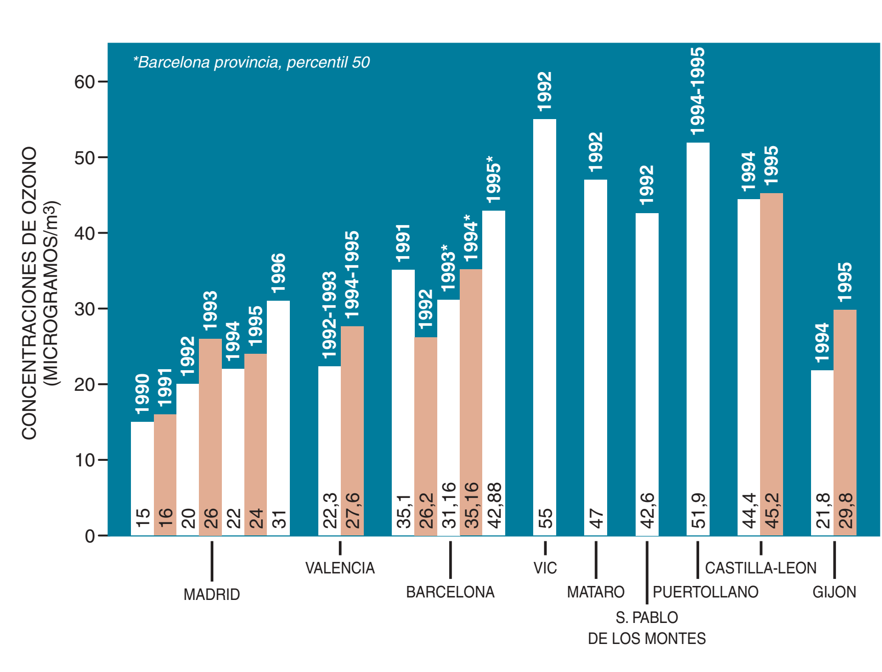
Bastante menos atención se ha prestado al ozono troposférico, uno de los principales productos de la neblina de las ciudades (*smog*). Observado por primera vez en 1952 en Los Angeles y otras ciudades de la costa pacífica de Estados Unidos, el ozono troposférico, dañino para la salud humana y la vegetación, afecta ya a los países mediterráneos, España incluida.

De la evolución de esa contaminación fotoquímica en España vamos a ocuparnos aquí. Nuestro país presenta altos niveles de insolación (32 provincias superan las 2500 horas solares anuales), elevadas emisiones de precursores (con valores medios de 3 toneladas/km^2 y año para los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, y máximos entre 10 y 40 toneladas/km^2 y año de estos mismos productos en las regiones más industrializadas), niveles de temperatura medio-altos en las áreas meridionales y una extensa costa de 3904 kilómetros, favorecedora de ciclos de brisa y procesos de recirculación. La conjunción de esa gavilla de factores facilita la contaminación fotoquímica.

El ozono troposférico procede de varias fuentes naturales. La más importante son las intrusiones estratosféricas y, en menor medida, las asociadas a descargas eléctricas de la baja atmósfera. Su concentración, determinada en 1900, fue de 10 partes por billón, lo que desde entonces se ha considerado concentración típica de una troposfera limpia.

Mediciones más recientes para el hemisferio norte alcanzaron valores de 20 a 50 partes por billón entre los años 1980 y 1990, con picos de 100 a 200 partes por billón en las grandes ciudades y con un incremento anual entre el 1 y el 2 %, corroborado en mediciones realizadas desde estaciones remotas, como la de cabo Arkona en la costa alemana del mar Báltico. Esa contribución antropogénica a las actuales concentraciones de ozono troposférico, unida a su vida media, que en condiciones meteorológicas favorables puede alcanzar los 200 días, nos indica que estamos ante un nuevo contaminante tenaz y creciente.

El ozono es un contaminante secundario. No lo emite fuente directa alguna, sino que se genera a partir



2. VALORES MEDIOS de ozono en todas las estaciones de estudio.



1. Pº de Recoletos
2. Gta. de Carlos V
3. Pza. de Callao
4. Pza. de España
5. Gta. de Quevedo
6. Pza. de Gregorio Marañón
7. Pza. de Marqués de Salamanca
8. Escuelas Aguirre (C/. Alcalá)
9. Pza. de Luca de Tena
10. Gta. de Cuatro Caminos
11. Ramón y Cajal
12. Pza. de Manuel Becerra
13. Vallecas (C/. Peña Gorbea)
14. Pza. Fernández Ladreda
15. Pza. de Castilla
16. Arturo Soria
17. Villaverde (C/. Real de Pinto)
18. Pza. Marqués de Vadillo
19. Pº de Extremadura
20. Moratalaz (Pza. P. Garnica)
21. Pza. de Cristo Rey
22. Pta. Toledo
23. Canillejas
24. C. de Campo

3. RED AUTOMATICA de medida de la contaminación atmosférica de Madrid. Consta de un nudo central (*topo rojo*), varias estaciones secundarias o remotas (*topos azules*) y la zona de protección especial que delimita la urbe (*perímetro de topos amarillos*).

Datos de las estaciones de la red automática de Madrid que miden ozono

ESTACIONES	NUMERO TOTAL DE DATOS	AÑOS	VALORES PERDIDOS
Estación 14	17088	1991 y 1992	3,5%
Estación 19	12471	1991 y 1992	34,6% y 5,9% resp.
Estación 20	8326	1992	1,5%
Estación 23	8204	1992	0,6%
Estación 24	8304	1992	12,8%

A excepción de la estación 19 a lo largo de 1991, el número de datos perdidos puede considerarse aceptable.

de precursores con el concurso de la fracción de onda corta de la radiación solar. Los precursores son óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Los óxidos de nitrógeno (NOx) constituyen una familia de ocho compuestos. Aquí importan el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2); los demás se encuentran asociados a éstos o se hallan en concentraciones muy bajas, carentes de interés.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) integran un conjunto aproximado de 600 productos, hidrocarburos en su mayoría, caracterizados por su baja presión de vapor. Oxidos de nitrógeno y COV proceden de numerosas fuentes naturales, pero va adquiriendo importancia creciente la contribución antropogénica asociada con la combustión, pirólisis o evaporación. Para el caso de los NOx, la razón entre la aportación antropogénica y la de origen natural es de 10 a 1.

En presencia de adecuados niveles de radiación solar, los productos precursores generan ozono y otros oxidantes. Ese proceso de contaminación fotoquímica, en directa relación con el tráfico intenso de las urbes, se desarrolla en tres fases. A una primera de inducción le sigue una segunda fase activa, caracterizada por la reacción entre productos y radicales, y radicales entre sí; la reacción provoca la acumulación de ozono y otros oxidantes. La fase final entraña la desaceleración del proceso; ocurre cuando decaen las concentraciones de precursores y la radiación solar.

La contaminación fotoquímica es un proceso complejo en el que intervienen unas 300 reacciones, orgánicas en su mayoría. Las concentraciones de fondo de otros productos típicos de atmósferas contaminadas, como el monóxido de carbono o metano, desempeñan un papel secundario.

El ozono es un gas fuertemente oxidante, debido a la alta capacidad de ceder electrones de uno de los tres átomos que forman su molécula; por ello, su presencia en la troposfera produce daños en los or-

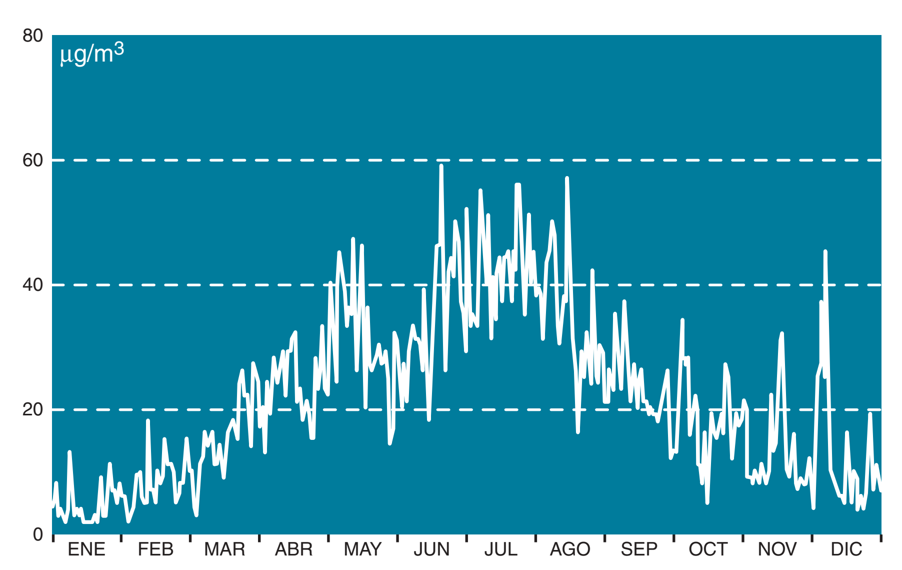
ganismos y en los materiales. En el hombre, el ozono insta una respuesta inflamatoria, que comporta cambios bioquímicos y celulares sobre todo en sujetos con problemas respiratorios o de alergia. Se ha comprobado también el debilitamiento de las defensas pulmonares en animales. El ozono constituye, por fin, uno de los contaminantes más fitotóxicos, capaz de reducir la fotosíntesis neta y aumentar la senescencia prematura de las plantas, lo que se traduce en la merma de la productividad agrícola y forestal. En España se han visto especialmente afectados los bosques de pino albar (*Pinus halepensis*), los cultivos de tabaco y hortalizas.

La acción oxidante del ozono se deja sentir en los materiales que contienen dobles enlaces, sean polímeros naturales (caucho, algodón, celulosa o cuero) o artificiales (pinturas, elastómeros o plásticos). Además, debido a su estructura molecular, el ozono posee fuertes bandas de absorción en el infrarrojo, lo que le convierte, cuando está presente en la troposfera, en un gas promotor del efecto invernadero. Su aportación al mismo se cifra en el 9 %.

Empiezan ya a cuantificarse los daños que la contaminación fotoquímica produce. Medio billón de pesetas pierde España cada año por su causa. A ese guarismo se ha llegado a partir de estudios comparativos en función de las concentraciones, condiciones climáticas y cultivos análogos, además de la aplicación de métodos de regresión no paramétricos.

En nuestra investigación, que cubre de 1990 a 1996, recogimos series temporales de contaminación en varios lugares que constituían una muestra representativa del conjunto nacional: Madrid, Barcelona, Valencia, San Pablo de los Montes, Puertollano y Gijón, más el territorio castellanoleonés. La muestra no se ceñía a zonas urbanas, sino que se extendía a aledaños y distritos suburbanos, de influencia industrial, marítima o ambas y rurales. El método de medida de ozono fue la absorción ultravioleta, basada en la ley química de Beer-Lambert, según la cual cuando la luz se transmite a través de un gas, su intensidad después de la transmisión guarda una relación con la intensidad anterior a la transmisión que depende de la densidad óptica de la muestra. En los primeros años del intervalo de estudio algunas estaciones medían todavía por quimiluminiscencia, método basado en la reacción entre ozono y etileno.

El análisis de las concentraciones registradas de ozono nos descubre diversas características del comportamiento del gas. En primer lugar, su carácter cíclico, diario y anual. En los ciclos de 24 horas se observan concentraciones muy bajas de ozono en la madrugada; al intensificarse el tráfico comienza la emisión de precursores que, según aumenta la radiación solar, incrementan las concentraciones de ozono troposférico cuyo valor máximo diario se al-



4. VALORES MEDIOS DIARIOS DE OZONO de Madrid correspondientes al año 1992. El ciclo anual muestra un perfil de tipo gaussiano, con débil asimetría. Los valores máximos se registran en relación con la radiación solar, aunque las concentraciones más intensas suelen medirse entre junio y julio.

Generación de ozono en el medio urbano

Consta de cuatro pasos principales, que esquematizamos:

- Introducción:

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$
$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$

- Aumento de la radiación solar:

$$NO_2 + h\nu\ (< 400\ \text{nanómetros}) \rightarrow NO + O\,(^3P)$$
$$O\,(^3P) + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

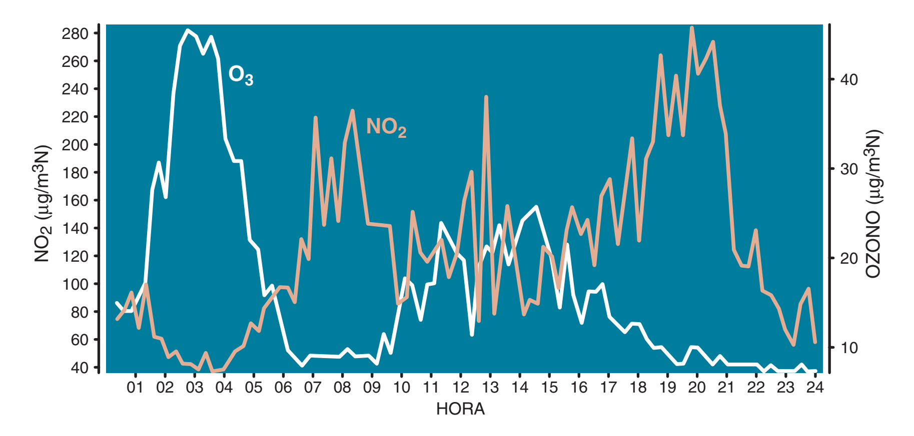
- Reducción instantánea:

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$

- En paralelo, formación de radicales que consumen NO:

$$OH^{\bullet} + RH \rightarrow H_2O + R^{\bullet}$$
$$R^{\bullet} + O_2 \rightarrow RO_2^{\bullet}$$
$$RO_2^{\bullet} + NO \rightarrow RO^{\bullet} + NO_2$$

La formación final de radicales peroxilo, derivados de los hidrocarburos presentes en las atmósferas urbanas, consumen óxido nítrico. En ausencia de estos compuestos, la concentración de ozono sería una quinta parte de la que habitualmente se encuentra en las urbes.



5. CONCENTRACIONES DIARIAS de ozono y de dióxido de nitrógeno de Valencia, correspondiente al mes de enero de 1996. Las concentraciones atmosféricas de NO_2 aparecen desplazadas entre 2 y 3 horas en relación a las emisiones de NO, que comienzan a descender según aumenta la radiación solar —y con ella, su descomposición fotolítica—, al tiempo que aumentan las concentraciones de ozono. Según va disminuyendo la insolación, las concentraciones de ozono decaen, mientras que las de NO_2 se mantienen por ser el resultado de varias reacciones fotoquímicas, como la descomposición de los peroxiacetilnitratos.

canzará entre las 13 y las 17 horas. La reducción de los niveles de radiación solar junto a las emisiones más bajas de precursores conducen a una disminución progresiva. Además del máximo de mediodía —especialmente en zonas costeras— se puede encontrar otro máximo nocturno que, en invierno, puede registrar valores superiores al de mediodía y que podemos atribuirlo a la fumigación desde capas superiores de la troposfera.

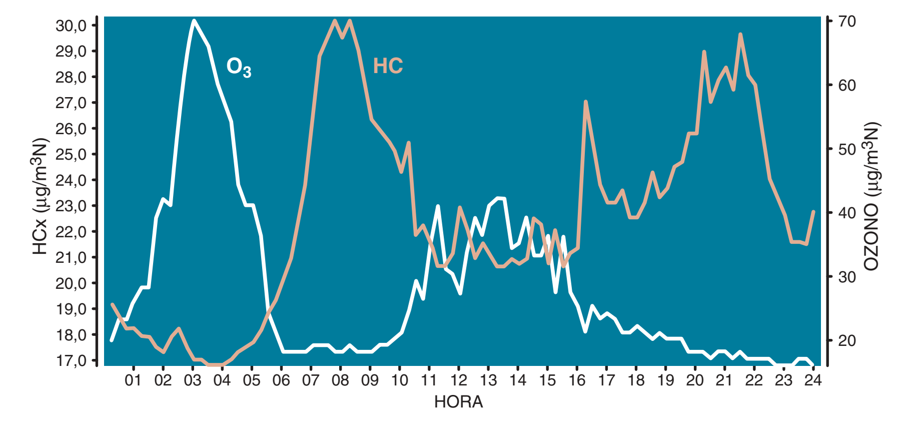
Por su parte, la temperatura ambiente, relacionada con los niveles de radiación solar recibidos, actúa directamente sobre la velocidad de las reacciones fotoquímicas, al tiempo que acelera las emisiones de precursores. Si atendemos a las interacciones implicadas, destacaremos las mantenidas entre el ozono y NO, NO_2 e hidrocarburos, principales productos de la contaminación fotoquímica; más débiles son las reacciones con CO o metano.

Entre el NO y el ozono se presenta una fuerte anticorrelación, cuyo período de semirreacción varía, en función de la concentración de ozono, entre 1 minuto y varios segundos; a efectos ambientales se la considera instantánea. Esta anticorrelación, confirmada en todas las estaciones, explica los bajos niveles de ozono urbano al constituir el óxido nítrico uno de sus sumideros atmosféricos más importantes. Entre el dióxido de nitrógeno y el ozono, la anticorrelación no es tan evidente, ni entre el ozono y los hidrocarburos.

Las concentraciones de ozono medidas en Madrid presentan valores medios moderados. Pero los valores medios no reflejan el verdadero comportamiento del gas. Tras los 20 microgramos por metro cúbico de media para Madrid en 1992, por ejemplo, se encuentran muchos valores horarios, especialmente en los meses de verano, que alcanzan o superan los 100 microgramos por metro cúbico. Dígase lo propio respecto de los valores medios calculados para Barcelona y Valencia, que muestran también valores moderados, aunque algo superiores a los de Madrid para el mismo período. Confirma este comportamiento el carácter moderado del ozono urbano, explicado por la fuerte relación de anticorrelación que mantiene en las atmósferas reductoras, especialmente con el óxido nítrico.

Valores superiores presentan las ciudades mediterráneas. Aumento que debe atribuirse a su situación costera; el régimen de brisas generado desde el mar recircula los contaminantes atmosféricos. Las brisas introducen los contaminantes de la línea de costa hacia el interior hasta varias docenas de kilómetros, en función de la orografía local. Al cabo de varios días, las masas de aire portadoras de contaminantes se recirculan hacia el mar en el propio ciclo de brisa, colocándose en una estructura estratificada que, tras procesos de subsidencia atmosférica, volverán a mezclarse con otras capas de aire a nivel de superficie, para repetir de nuevo el ciclo.

El análisis de las concentraciones de ozono en el entorno provincial y suburbano de Barcelona muestra valores medios y horarios muy elevados. El número de ocasiones en que se superan algunos de los umbrales es superior a los 200 por año y pone de manifiesto la incidencia del ozono rural frente al urbano: cuando las masas de aire ricas en contaminantes primarios son desplazadas fuera de las ciudades, según la dirección predominante de los vien-



6. CONCENTRACIONES MEDIAS HORARIAS de ozono e hidrocarburos en Valencia, correspondientes al 29 de enero de 1996. Los hidrocarburos comienzan a emitirse en las primeras horas de la mañana, cuando la formación de ozono es insignificante, iniciando la reacción con los radicales oxidrilo para formar radicales peroxilo, según el mecanismo descrito en la fase inicial de la contaminación fotoquímica. En la medida en que estos radicales van reaccionando con el NO, la concentración de hidrocarburos va disminuyendo, al tiempo que comienza la acumulación de ozono paralelamente a los mayores niveles de radiación solar. Estas tendencias conducen a un intervalo en donde las concentraciones de ambos productos coinciden.

FEDERICO VELAZQUEZ DE CASTRO, FEDERICO LOPEZ MATEOS y EMILIANO HERNANDEZ MARTIN son profesores de la Universidad Complutense de Madrid. Velázquez centra su investigación en química del medio ambiente. López Mateos es catedrático de química industrial en el departamento de ingeniería química, y Hernández, de física de la Tierra, astronomía y astrofísica.

tos, continúa la formación de ozono, que no encontrará ahora las concentraciones necesarias de NOx para su eliminación. Si coinciden con condiciones meteorológicas desfavorables en los enclaves rurales, las concentraciones de ozono procedentes de núcleos urbanos e industriales se unirán a las generadas en los propios enclaves y se mantendrán mientras duren los períodos de estabilidad atmosférica.

Aunque las concentraciones medias de ozono en Puertollano son elevadas y corresponden a procesos de síntesis local, sorprende la diferencia encontrada entre el área norte y el área sur, donde aparecen valores medios que son casi el doble en la zona más alejada de las fuentes emisoras, lo que confirma la presencia de mayores valores de ozono en las zonas a sotavento de los núcleos de emisión.

En esta misma línea, las concentraciones registradas en enclaves rurales o de fondo, como San Pablo de los Montes o la Comunidad de Castilla-León, presentan valores elevados y, desde luego, superiores a los núcleos urbanos o zonas industriales. Ese fenómeno sugiere una triple consideración: mayor presencia de ozono en el medio rural, alto nivel general de ozono en todo el territorio y necesidad de disponer de redes y estaciones de medida en las áreas suburbanas, densamente pobladas, que son las que registran mayores concentraciones de ozono.

Las concentraciones de ozono muestran a lo largo de los últimos años una tendencia creciente. En Madrid las concentraciones medias se duplicaron de 1990 a 1996. En el entorno provincial de Barcelona, todos los enclaves de medida reflejaron ese alza entre 1993 y 1995. Los datos de Valencia, Castilla-León y Gijón confirman idéntica trayectoria.

El ozono troposférico se ha convertido, pues, en uno de los contaminantes más agresivos de España, debido a las industrias, al tráfico de sus ciudades y carreteras y a los altos niveles de radiación solar recibidos. La tendencia creciente de sus concentraciones en nuestro país, la aparición de episodios peligrosos en meses en que la radiación solar no es aún muy intensa y la detección de concentraciones elevadas en todo el territorio, obliga a prestarles la atención que merecen.

Cierto es que no todas las zonas del territorio nacional registran los mismos niveles. Existe una desviación espacio-temporal con respecto a los núcleos precursores por la interferencia con otros productos y los fenómenos atmosféricos (regímenes de vientos). Las zonas periféricas a sotavento de las emisiones y los núcleos rurales pueden registrar mayores concentraciones que las ciudades o los núcleos industriales. La costa levantina es otro de los puntos de mayor incidencia de este contaminante debido al régimen de brisas del mar Mediterráneo.

Atajar el mal por su raíz, por los precursores, exige restringir la contaminación emitida por los vehículos mediante la instalación obligatoria de catalizadores, el uso de generadores de energías más limpias, la creación de sistemas adecuados de depuración de óxidos de nitrógeno y la sustitución de componentes en las industrias que utilizan compuestos orgánicos volátiles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OZONE PRODUCTION IN THE RURAL TROPOSPHERE AND THE IMPLICATIONS FOR THE REGIONAL AND GLOBAL OZONE DISTRIBUTIONS. S. Liu *et al.*, en *J. Geophys. Res.* n.º 92, pág. 4191-4207, 1987.

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA COMUNIDAD VALENCIANA: ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LOS PROBLEMAS EN EL MAESTRAZGO Y ELS PORTS DE CASTELLÓN. M. Millán y M. J. Sanz. Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, 1992.

DAÑOS VISIBLES POR OZONO EN ACÍCULAS DE *PINUS HALEPENSIS* EN GRECIA Y ESPAÑA. B. Sánchez *et al.*, en *Ecología*, n.º 6, págs. 131-134, 1992.

OZONE: CAUSATION AND AGGRAVATION OF LUNG DISEASES. J. Ström *et al.*, en *Indoor Environ.* n.º 3, págs. 69-78, 1994.

Shawn Carlson

Acuicultura de plancton

El acuario de la bahía californiana de Monterrey alberga una de las mejores exposiciones marinas del mundo. Por ello, cuando la dirección me ofreció una visita personal entre bastidores, no pude negarme. Tim Cooke y Ed Seidel abrieron ante mis ojos un mundo fascinante. Tim me introdujo en los secretos del cultivo de plancton.

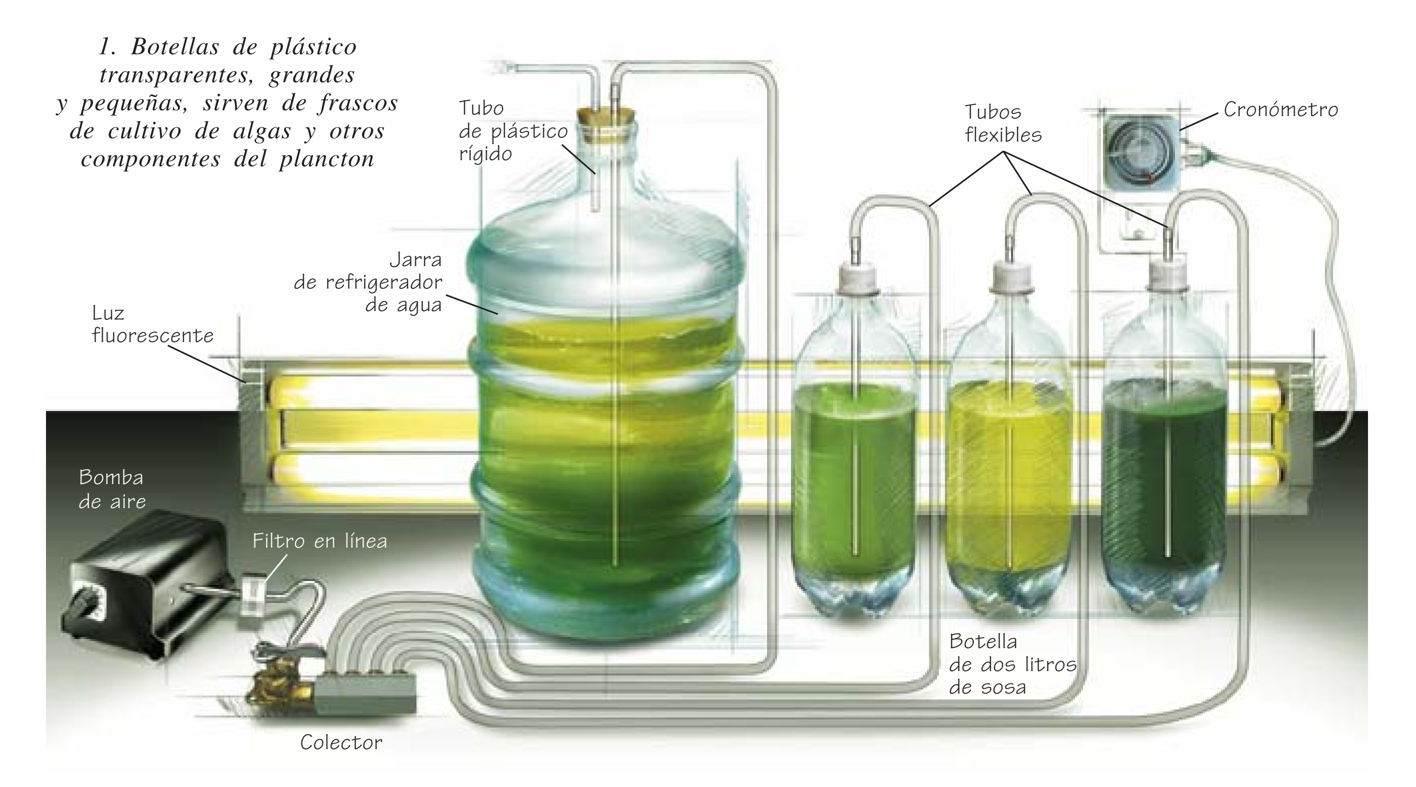
Que conoce de maravilla. El acuario de la bahía cultiva plancton en cantidades industriales para abastecer a los millares de voraces peces, crustáceos y medusas del recinto. Pero los organismos unicelulares que componen el plancton no son sólo un alimento para peces; por sí mismos revisten el máximo interés y pueden ofrecer a los aficionados incontables horas de observaciones deliciosas. Vistos al microscopio, las plantas (fitoplancton) y animales (zooplancton), minúsculos, aparecen asombrosamente bellos y complejos.

Se prestan a muchos tipos de investigación. En el fitoplancton podemos estudiar la bioquímica de la fotosíntesis. Los rotíferos del zooplancton, con sólo 400 micras de ancho, vienen a ser el equivalente microscópico del canario del minero; dada su sensibilidad a las toxinas, pueden emplearse para vigilar la salubridad de estuarios y cursos de agua.

Los aficionados pueden criar plancton, marino o de agua dulce, para examinarlo, alimentar animales acuáticos de mayor tamaño o usarlo en proyectos de investigación de cierto empaque. A los entusiastas del océano les recomiendo que se acerquen al comercio de acuarios más cercano y se hagan con un equipo para preparar 200 litros de agua marina y con un comprobador de salinidad sencillo. El plancton puede proporcionárnoslo el departamento de ecología marina de la facultad de ciencias biológicas más cercana. Conviene procurarse también un manual. Recientemente crié una partida de *Nannochloropsis* y *Tetraselmis*, algas verdes que viven en agua dulce y marina. También crié *Brachiornus plicatilis*, un pequeño rotífero de agua salada. A los aficionados a las diatomeas, alga que refuerza sus paredes celulares con estructuras de sílice de fantástica belleza, les aconsejaría que probaran con *Chaetoceros*.

Las botellas de plástico transparente para sosa cáustica del tamaño de dos litros resultan unos frascos de cultivo ideales. Para evitar la contaminación bacteriana hay que esterilizarlo todo antes de empezar. Por ello, en una tienda de artículos para piscinas se adquirirá cloro granular y de éste se disolverá la mayor cantidad posible en 30 mililitros de agua tibia. Luego prepárese una solución 10 a 1 mezclando cinco mililitros (una cucharadita de café) de la solución concentrada de cloro en 45 mililitros de agua destilada. Póngase cuidado en no transferir ningún cristal no disuelto en la solución esterilizadora que se está preparando.

Seguidamente, se llenan casi del todo los recipientes de dos litros, con agua destilada o con agua marina, y se añaden a cada uno cinco gotas de la solución esterilizadora. Se esperan



1. Botellas de plástico transparentes, grandes y pequeñas, sirven de frascos de cultivo de algas y otros componentes del plancton

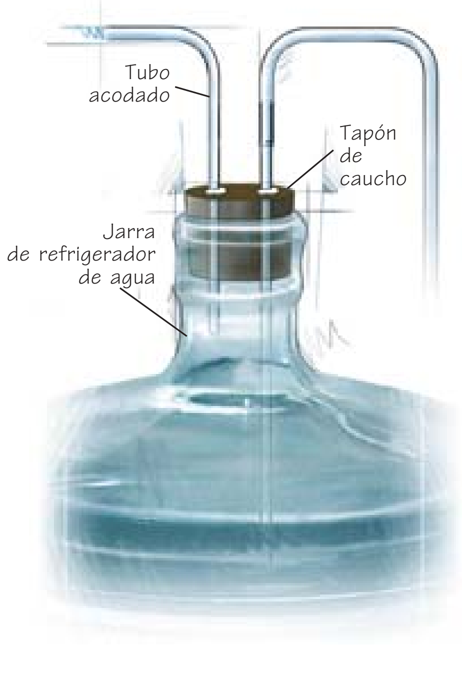
dos horas a que el cloro cause efecto. El cloro se evapora rápidamente de la solución, por lo que hay que confeccionar una remesa nueva de esterilizador cada vez que se necesite. Vista así, la evaporación es un fastidio, pero podemos aprovecharla para eliminar el cloro de los frascos burbujeando aire en el agua durante unas 24 horas. Unas pocas gotas de agente eliminador del cloro desclorinante nos harán el trabajo en segundos; lo venden embotellado en las tiendas de peces tropicales. En cualquier caso, no se introducirá el plancton hasta verificar, con un equipo de control de piscinas, la inexistencia de cloro.

Una bomba para acuario de 40 litros puede airear sin dificultad 10 frascos de cultivo. Empléese un colector multipuerta (una pieza común de fontanería de acuario con una entrada y muchas salidas) para distribuir el aire entre los cultivos. Algunos tubos de plástico rígido (también disponibles en las tiendas de acuarios) nos permitirán inyectar el aire en el fondo de cada frasco. Pero hay que bombearlo a través de un filtro con orificios de 0,5 micras, tal como el SLFH05010 de Millipore, para que las bacterias no invadan los recipientes esterilizados.

Enriquézcase ya cada frasco con los nutrientes adecuados, que nos indicarán en las tiendas de acuarios o en el departamento universitario mencionado, según la especie de alga que deseemos cultivar. Si compramos las muestras de plancton en el comercio, suelen adquirirse en pequeñas cápsulas de plástico llenas de gelatina. Para extraer las células vivas, se sumerge la gelatina bajo una capa fina de la solución de cultivo y se deja en remojo doce horas. Los microorganismos saldrán fácilmente de la gelatina oprimiéndola suavemente con un bastoncillo de algodón estéril. Cada frasco se inocula con unos 10 mililitros (dos cucharaditas de café) de la solución resultante. A cada paso hay que asegurarse de que todos los instrumentos estén libres de gérmenes lavándolos cuidadosamente con detergente y solución esterilizadora y enjuagándolos luego con agua destilada.

En principio, los cultivos deben incubarse a 19 grados Celsius, pero no tuve dificultades con los míos dejándolos reposar a la temperatura ambiente. Evítese la exposición a la luz solar directa, ya que los rayos solares pueden calentar los frascos hasta niveles letales. Hemos de colocar los frascos frente a una lámpara fluorescente intensa durante 18 horas diarias. Aunque nos serviría una bombilla corriente de 2500 lúmenes, algunos acuaristas recomiendan "luces de crianza", que producen más cantidad de los fotones azules energéticos que intervienen en la fotosíntesis.





Un tapón de rosca sin apretar en la botella de sosa (arriba) *permite el escape del aire que se inyecta por el tubo central e impide la entrada de contaminantes. Un tapón de caucho con un tubo acodado inserto en uno de los dos orificios* (derecha) *presta la misma función en la jarra de enfriamiento del agua*

Ya puesta la cosa en marcha, hay que mantener el agua constantemente aireada. Aproximadamente en una semana, el recipiente debe haber adquirido un tinte verde obscuro, señal de que el cultivo está maduro y listo para alimentar a otras criaturas acuáticas. En sólo diez días, la población celular puede generar residuos suficientes para emponzoñarse a sí misma. No conviene, pues, esperar demasiado. Si se extraen 10 mililitros de cultivo maduro para iniciar una nueva partida, nos ahorraremos la compra de gelatina iniciadora.

Los profesionales crían cantidades mayores de algas en unos recipientes de 20 litros llamados bombonas. Para nuestros fines vale una jarra desechada de refrigerador de agua. Los acuaristas suelen hacer que el aire atraviese las bombonas sin contaminarlas merced a un dispositivo especial de tubos. Yo obtuve el mismo resultado acodando un tubo de acuario de plástico rígido con una pistola de aire caliente.

Si nos decidimos a criar una gran cantidad de plancton, llenaremos de agua destilada o salada un jarro de agua vacío y añadiremos cinco mililitros de solución esterilizadora nueva. Como antes, tras dos horas de espera, eliminaremos el cloro y comprobaremos la eficacia de la maniobra. Agregaremos los nutrientes necesarios e inocularemos el jarro con un frasco completo de cultivo maduro. Se conecta la bomba de aire y se confirma que el recipiente recibe abundante luz fluorescente.

La velocidad de crecimiento puede seguirse con una varilla de aforo, de venta en acuarios. Se sumerge la varilla hasta que el agua verdusca oscurece el anillo negro del fondo, luego se lee la profundidad en la escala lateral. Para cada especie, puede determinarse la densidad de células mediante una tabla que se suministra con la varilla. En mi caso, tras una semana más o menos, el jarro de agua contenía más de diez millones de células vivas en cada mililitro, unos 200.000 millones de células en cifras redondas.

Con un suministro estable de algas, aunque sólo sea de dos litros, nos basta para producir rotíferos. Aunque los procedimientos para criar esos refinados depredadores acuáticos no son tortuosos, revisten mayor complejidad que los sencillos pasos aquí descritos para cultivar las algas que los alimentan.

La Society for Amateur Scientists puede suministrar un filtro de aire y un tapón de medida bombona por 20 dólares. Para más información, consulte el sitio Web de la sociedad, www.sas.org y haga clic en "Forum". Se puede escribir a la sociedad a 4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.

Glenn Zorpette

Enfoque con destello

Las cámaras de alta calidad emplean todas el mismo sistema básico para el enfoque automático, conocido como auto-enfoque por detección de fase. En una cámara reflex monolente (o cámara SLR), la luz procedente de una parte de la escena atraviesa el objetivo y luego el espejo reflex, que es parcialmente transparente. (Al oprimir el botón del disparador, el espejo reflex se endereza de golpe y la imagen cae sobre la película.) Un subespejo, sujeto en el reverso del espejo reflex, canaliza la luz que atraviesa el espejo principal hacia el módulo de auto-enfoque, situado abajo.

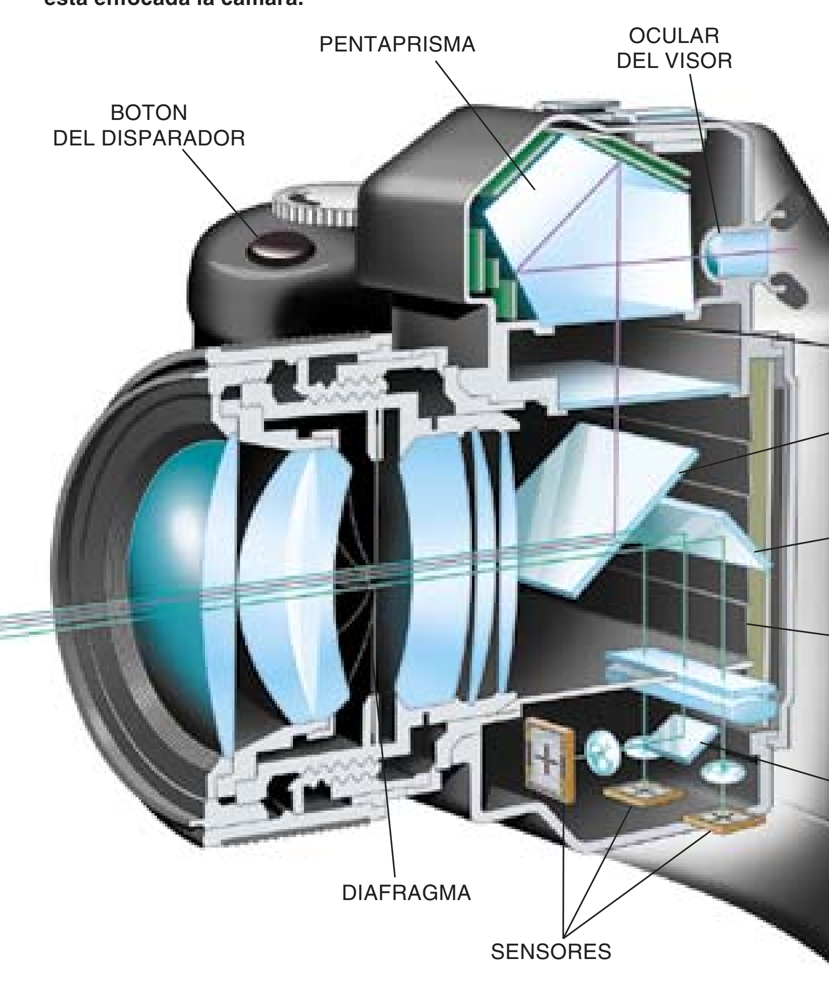
Tras atravesar varias lentes y filtros, los rayos llegan a una red de detectores de carga acoplada (CCD) sensibles a la luz. La distancia entre los elementos CCD iluminados indica cuánto le falta a la imagen para estar enfocada. Un circuito lógico monitoriza continuamente esa separación y acciona un motor que hace girar el anillo de enfoque de la lente, desplazando el foco. Cuando la separación coincide con un valor prefijado, el circuito lógico para el motor y lanza destellos en el visor para indicar que tenemos enfocada la imagen.

En torno al esquema básico de enfoque automático por detección de fase giraron las patentes concedidas en EE.UU. a Honeywell durante los años setenta. La técnica de Honeywell se empleó primero en la Konica C35 AF, una cámara de apuntar-y-disparar que a finales de los años setenta se vendió mucho pero brevemente. Comparado con los sistemas actuales, aquel prototipo, lento, adolecía de poca luminosidad y contraste escaso. A mediados de los años ochenta los japoneses, que llevaban 15 años trabajando en los sistemas de enfoque automático, empezaron a introducir mejoras en los sistemas de auto-enfoque por detección de fase en los modelos que vendían en EE.UU.

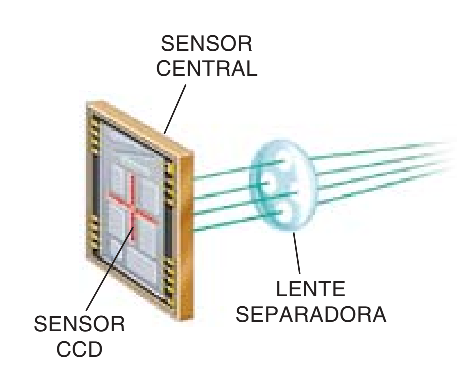
Honeywell demandó a Minolta por su cámara Maxxum 7000, en un pleito por violación de patente famoso por sus connotaciones nacionalistas en unos momentos en que los temores al predominio técnico nipón subían al máximo en EE.UU. Al final, en 1992, el jurado declaró culpable a Minolta, que hubo de pagar a Honeywell 127,5 millones de dólares por la licencia del sistema de enfoque automático y una técnica afín de destellos de baja intensidad. Otros fabricantes japoneses se vieron obligados a llegar a acuerdos parecidos con Honeywell.

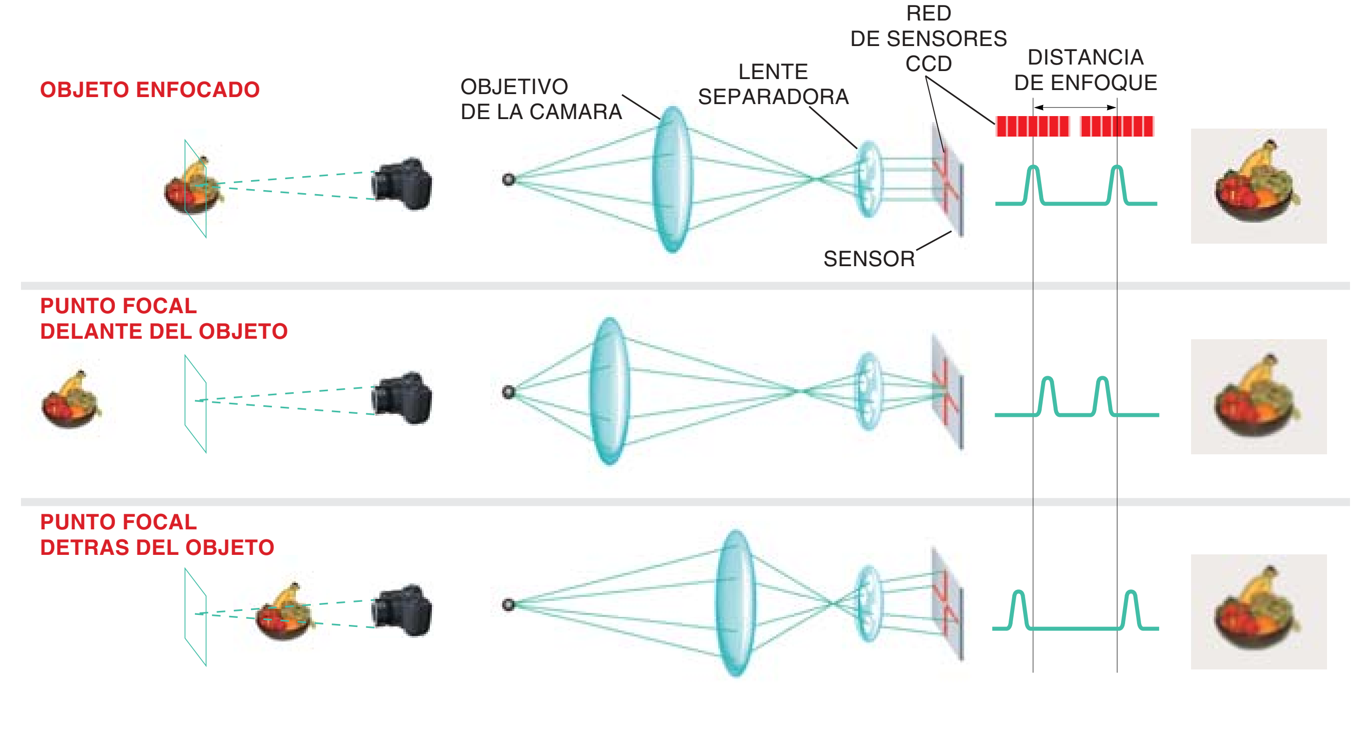
El resultado un tanto deficiente de los primeros sistemas de enfoque automático le dieron a esta técnica un mal nombre entre los fotógrafos profesionales. Pero sus grandes mejoras en velocidad y fiabilidad terminaron por ganar ese segmento del mercado, y hoy el auto-enfoque es una característica estándar en las cámaras de 35 mm desde los modestos aparatos de apuntar-y-disparar hasta los modelos profesionales de la gama más alta.

EN LAS CAMARAS SLR DE TECNICA AVANZADA el auto-enfoque está vinculado a otras funciones. La mayoría realizan una lectura fotométrica de una zona "puntual", apenas un porcentaje reducido de la imagen. En esos modelos, el enfoque automático puede acoplarse al fotómetro, de modo que el aparato enfoca al objeto a la vez que toma en él una lectura exposimétrica de la zona puntual. Un sistema refinado de programación permite discernir cuál es el objeto probable. En la pantalla unos destellos indican cuál de los distintos conjuntos de auto-enfoque se activa, revelando sobre qué objeto está enfocada la cámara.



UN MODULO de auto-enfoque típico incluye varias parejas de redes de sensores CCD, cada una con el correspondiente juego de lentes separadoras. Las posiciones de las parejas de redes permiten que la cámara enfoque objetos situados en distintas partes del visor (*derecha, izquierda*). Las lentes separadoras dividen el haz de luz procedente del objeto, iluminando cada mitad de la pareja de redes de sensores.







EL DIAGRAMA OPTICO muestra de qué modo determina la cámara la posición del plano focal. Las lentes separadoras crean dos imágenes iguales, cada una de las cuales cae sobre una mitad de una pareja de redes de sensores CCD. Cuando entre esos puntos de luz media una distancia prefijada, el objeto está enfocado. Si la separación es demasiado pequeña (*centro*), el foco está delante del objeto; si es excesiva, el foco está detrás del objeto.

¿Sabía usted que ...?

- En los primeros días de las cámaras SLR de auto-enfoque, el motor que hacía girar el anillo de enfoque de la lente solía estar en la misma lente. Andando el tiempo, los fabricantes pasaron ese motor al chasis de la cámara. Todos menos Canon, cuyas lentes de auto-enfoque llevan un motor interno para el enfoque. Con el motor en el chasis, un chasis mejor confiere nuevas posibilidades a un juego de lentes ya existente (y a menudo caro). Por otra parte, con el motor en la lente, aquél puede adaptarse al tamaño y peso de cada lente, muy variables entre las lentes de diferentes distancias focales.

- Las cámaras SLR de técnica avanzada poseen una característica de auto-enfoque continuo que permite al usuario tomar imágenes nítidas de un objeto que se mueva acercándose o alejándose del aparato. Cuando el pulsador del obturador se oprime a medias, el sistema de enfoque automático se centra en el objeto móvil y comienza a seguirlo. Cuando el pulsador del obturador se oprime hasta el final, la lente continúa siguiendo al objeto hasta el instante en que el obturador realmente se abre, lo que puede ocurrir un cuarto de segundo después de que se haya apretado a fondo el pulsador.

- Según sus fabricantes, el mejor sistema de enfoque automático moderno puede funcionar con niveles de iluminación muy bajos, por ejemplo, de un valor de exposición de –1, lo cual corresponde a una cantidad de iluminación que requeriría una exposición de 4 segundos y un diafragma de 1,4 para una película de sensibilidad 100. Los sistemas primitivos no podían trabajar bajo niveles de iluminación inferiores a un valor de exposición de +4, que corresponde a una exposición de 1/8 de segundo con los mismos diafragmas y sensibilidad. A niveles de iluminación muy bajos, los sistemas mejores enfocan un patrón de luz roja, proyectado brevemente desde el generador de destellos sobre el objeto.

NEXOS

James Burke

El gran plan

Cuando empiezo a sentir que mi vida se reduce a una colección de curiosidades y fuentes secundarias, entono una alegre tonada y recuerdo las palabras del reverendo William Paley (1743-1805), un reputado prelado inglés que consiguió la proeza de no tener que predicar en las muchas parroquias y capillas que casi nunca visitaba. Si en alguna ocasión, muy rara, se subía al púlpito, se guiaba por el precepto de "escribe un sermón y roba cinco".

En un período en el que los cambios científicos y técnicos lo ponían todo en solfa, su *Teología Natural*, publicada en 1802, constituye el último ejemplo de la idea del Gran Plan antes de Darwin, donde defendía la tesis fijista de las especies y apuntalaba la religión al demostrar que un examen racional del diseño de la naturaleza probaba la existencia de Dios. El cuello 'rígido' del elefante, por ejemplo, quedaba compensado con una trompa flexible. Todo en la naturaleza, por minúsculo que fuera, existía con una intención concreta, y el conjunto operaba con un fin común.



Mediante el recurso al "escribe uno y aprópiate de cinco", la metáfora por la que mejor se recuerda el trabajo de Paley —"Dios el relojero"— no era suya. No lo fue ni siquiera el meollo de la idea, que probablemente tomó de algo escrito un siglo antes: *La Sabiduría de Dios*, cuyo tema y cuya intención son prácticamente los mismos.

Su autor, John Ray (otro clérigo naturalista), vivió también una época en la que se estaban socavando los cimientos epistemológicos. En el caso de Ray se trataba del alud de especies nuevas que descubrían las exploraciones en Oriente y Occidente. Se impuso clasificar tamaña confusión. Uno de los primeros ecoturistas, viajó por Gran Bretaña y el continente europeo, observando y garabateando: describió cuanto emergiera del suelo en una obra de varios volúmenes (*Historia de las Plantas*) que incluía 10.000 nuevas entradas. Un magno trabajo, a pesar del cual Ray terminaría eclipsado por el taxónomo de éxito más arrollador de todos los tiempos: Linneo. Quien tuvo con Ray un bonito detalle: dar su nombre a un camote. ¡Hombre, gracias!

Contemporáneo de Ray en Cambridge y diestro en matemáticas y griego (una mezcla muy común) fue otro que terminó ensombrecido (porque, ¿quién ha oído hablar de Isaac Barrow?). El genio suizo Jakob Bernoulli proclamó poco tiempo después de la muerte de Barrow que su trabajo había anticipado el cálculo de Newton (los historiadores aún no se ponen de acuerdo sobre si Barrow fue para el Gran Gravitador un maestro, una influencia o uno de esos 'cinco sermones'). Inspirara o no a Newton, es innegable que sólo éste y poquísimos más habrían podido seguir y entender los trabajos Barrow.

Quién sí se adelantó a Newton en el cálculo (o no, los historiadores aún disputan sobre la prioridad) fue Gottfried Leibniz, cuyos inmensos talentos aguardan aún adecuado reconocimiento en la mayoría de las aulas. Entre las muchas ideas que salieron de su cerebro, Leibniz creó un alfabeto para razonar, en el que la gramática y el vocabulario fueran símbolos, que pudieran manipularse de forma innovadora en una máquina. En 1673 presentó en Londres un prototipo realizado en madera. Fracasó y fue objeto de irrisión en uno de los artículos zumbones y satíricos de Jonathan Swift.

Nótese, Swift ponía en solfa a todo el mundo, lo que puede muy bien haber sido el motivo de por qué nunca llegó a nada, ni hizo carrera. Característico de su talante fue irritar al gobierno británico cuando llamó la atención sobre la hambruna y la alta tasa de natalidad en Irlanda y propuso como solución añadir niños al menú. Otro escándalo irlandés que encendió la ira de Swift fue lo que se conoció como "el medio penique de Wood". En 1721 la amante del rey Jorge, Ehrengarde Melusina von der Schulenburg, una dama famosa por su codicia que no por su belleza, consiguió para William Wood la licencia para acuñar la nueva moneda irlandesa, a cambio de una importante cantidad de dinero. Wood se procuró un pequeño beneficio reduciendo la cantidad de cobre de las monedas, sin decir una palabra a los irlandeses. Cuando estos se sublevaron (como el mismo Swift), Wood perdió su licencia (y otra que tenía para la nueva moneda americana).

La fundición de Wood utilizaba carbón de coque limpio de impurezas, una idea del eminente maestro herrero Abraham Darby, quien pronto se dio cuenta de lo que la máquina de vapor iba a suponer para el mercado del metal. Construyó una metalúrgica avanzada en Coalbrookdale, junto al río Severn. Tan bien le fue, que la tercera generación aún se dedicaba a ello. En 1802, en la fundición de Abraham III se construyó la primera locomotora de alta presión, diseñada por Richard Trevithick, que se utilizó en el beneficio del mineral.

Intensa fue la vida de Trevithick: inventor, empresario y amigo íntimo de personalidades. Pasó 10 años como ingeniero en Sudamérica y regresó sin un ochavo para morir endeudado. Su carrera había empezado en la presentación londinense de su locomotora, a la

que acudió un antiguo maestro de escuela de Rumford, N. H. Ben Thompson, quien había luchado al lado de los británicos en la Guerra de la Independencia norteamericana, por lo que hubo de retirarse a Inglaterra. Allí fundó la Regia Institución, se convirtió en Sir Benjamin, y luego (en agradecimiento por sus servicios en Alemania) en conde von Rumford.

Thompson fue otro inventor con sentido práctico. Tuvo ideas ingeniosas sobre el combustible y las chimeneas que aplicó a la calefacción de los hogares. Llegó a ser un experto en calor y ganó una candente disputa ("El calor es resultado del movimiento") con el francés Claude-Louis Berthollet ("No, no lo es"). Berthollet era por entonces una eminencia de la química. No sólo halló que la reacción química dependía de la masa, sino que descubrió también el efecto blanqueante del cloro, amén de trabajar con todas las estrellas (Lavoisier, Monge, Gay Lussac et al.), ser nombrado comisionado de agricultura, participar en la reforma de la enseñanza, entrar en la Academia Francesa, profesor y galardonado con la legión de honor. Napoleón le quiso lo bastante como para llevárselo a la ocupación francesa de Egipto. También lo envió a Italia para decidir qué obras saquear del magnífico arte italiano. En 1804 Berthollet dirigió la casa de la moneda francesa.

Uno de los burócratas y compañeros menos ilustres de Berthollet fue un desconocido de nombre Laminière. Todo lo que he podido encontrar de su biografía es que en 1815 su hija Adèle se convirtió en la primera esposa del hijo de la máxima autoridad judicial de Terranova, Randolph Isham Routh, que había sido comisariado británico en Waterloo, cuando la suerte le dio la espalda a Napoleón. Tras la muerte prematura de Adèle, Routh se casó con la prima de la máxima autoridad judicial de Canadá (¿acaso era Routh un forofo de los juzgados?). Tuvieron un hijo, Edward, que enseñó en Peterhouse, Cambridge, y dinamizó la dinámica. Se trata probablemente de uno de los mejores profesores de matemáticas de todos los tiempos. Entre 1862 y 1888, una sucesión ininterrumpida de 22 alumnos suyos recibieron el más importante premio anual de matemáticas. El ganador en 1865 fue John William Strutt, luego Lord Rayleigh y mucho más: miembro del Consejo Privado, de la Regia Sociedad, medalla de Rumford, rector de Cambridge, Nobel por el aislamiento del argón y un largo etcétera.

La razón de que aparezca en este hilván modesto de nexos es que el mismo año que él ganó el premio de matemáticas, Alfred Marshall quedó segundo. Probablemente signifique más que el propio Rayleigh para muchos lectores, porque en 1890 escribió lo que ha sido definido como el mejor tratado de economía de su generación: *Los principios de la economía*. Una obra que ayudó a configurar la economía del siglo XX, un gran plan, si se quiere, de cómo funcionaba todo.

Pero no tan grande como el del bisabuelo de su mujer, William Paley.

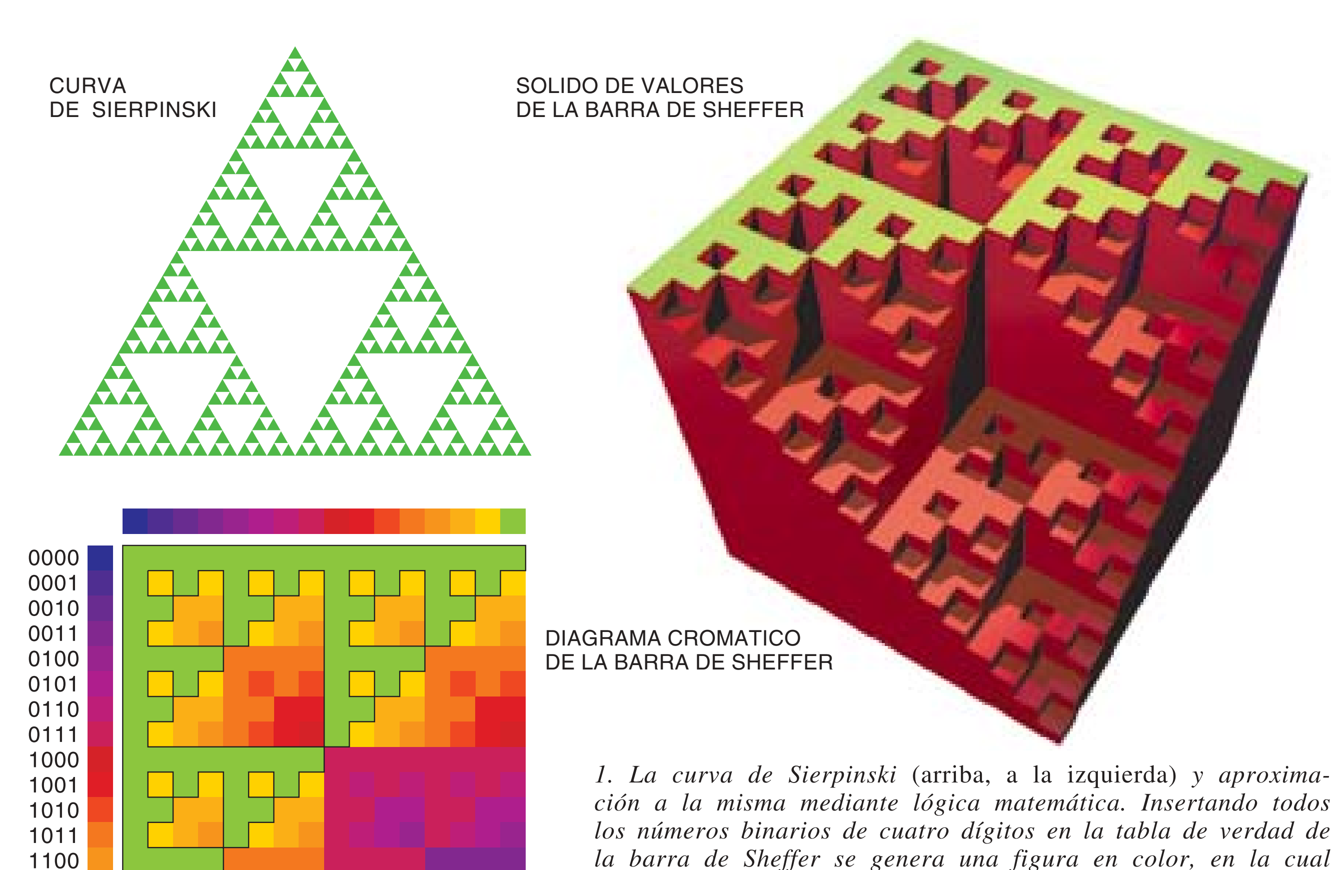
Ian Stewart

Guía fractal al tatetí

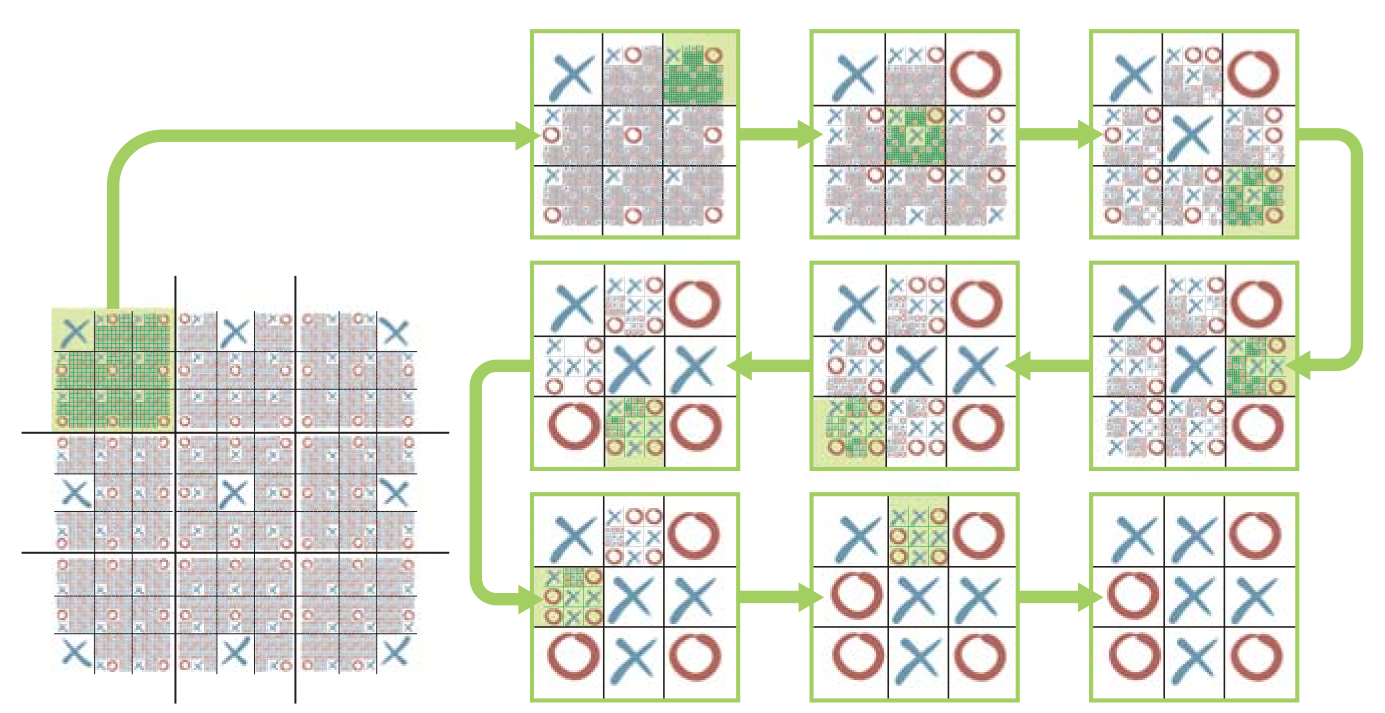
Me persigue una fractal. En un artículo reciente [*véase* "La ubicua curva de Sierpinski", octubre de 1999] expuse diversas apariciones de la figura fractal conocida por curva de Sierpinski, curva que puede obtenerse a partir de un triángulo, del que se va sucesivamente eliminando un triángulo invertido de tamaño mitad. Desde entonces, los lectores me han estado señalando nuevos avistamientos de esta versátil figura. Su última encarnación hase producido en el dominio de la lógica matemática. Patrick Grim y Paul St. Denis, de la Universidad de Nueva York en Stony Brook, me han enviado un artículo titulado "Fractal Images of Formal Systems" (Imágenes fractales de sistemas formales), publicado en *Journal of Philosophical Logic*, vol. 26, n.º 2, páginas 181-222; 1997.

Una fractal es una figura o configuración divisible en partes que resultan ser réplicas a menor escala de la figura total. Una fractal genuina, como la curva de Sierpinski, tiene estructura fina a todas las escalas de amplificación: cualquier porción de ella, por mínima que sea, será semejante al todo. Una cuasi-fractal, en cambio, es sólo aproximación de una fractal auténtica: posee una estructura detallada a lo largo de una gama extensa, aunque finita, de escalas de ampliación. Los patrones de las cuasi-fractales no subsisten hasta escalas infinitamente finas, pero debido a que el ojo humano no puede distinguir detalles tan diminutos, las cuasi-fractales ofrecen un aspecto convincentemente fractal. Uno de los logros de Grim y St. Denis ha consistido en idear un diagrama cuasi-fractal que representa todos los posibles juegos de tres en raya.

Todo el mundo sabe que, con papel y lápiz, el tres en raya se juega sobre una plantilla de 3×3 casillas cuadradas, con dos jugadores, X y O. Los jugadores van por turno marcando las casillas; gana el primero que consiga alinear tres marcas (en horizontal, en vertical o en diagonal). Es costumbre que X salga primero; toda partida bien jugada acaba en tablas. Ahora bien, ¿cuántas son las partidas posibles? En la primera jugada de X, éste tiene 9 casillas para elegir; el jugador O, después, ha de optar entre 8, y así sucesivamente. Por tanto, el número total de



1. La curva de Sierpinski (arriba, a la izquierda) *y aproximación a la misma mediante lógica matemática. Insertando todos los números binarios de cuatro dígitos en la tabla de verdad de la barra de Sheffer se genera una figura en color, en la cual la disposición de los cuadrados verdes recuerda la curva de Sierpinski* (a la izquierda). *También se puede observar la figura en el sólido de valores de la barra de Sheffer* (arriba)



2. La totalidad de las partidas posibles de tres en raya puede quedar plasmada en un diagrama cuasi-fractal. Los cuadrados de una plantilla de 3 × 3 se dividen en plantillas menores, donde se exponen todas las jugadas de apertura (mitad derecha más cercana). *Las jugadas siguientes van apareciendo ilustradas en plantillas menores todavía, creadas por subdivisión de los cuadrados libres. Ampliando repetidamente secciones del diagrama* (mitad derecha más alejada) *podemos ver una partida de muestra*

partidas es 9! = 9 × 8 × 7 × 6 × 5 × 4 × 3 × 1 = 362.880.

Veamos cómo se construye la cuasi-fractal de Grim y St. Denis. Se empieza con una plantilla cuadrada grande de 3 × 3, y se divide cada casilla en una subplantilla de 3 × 3 (*véase la figura 2*). El jugador X dispone de 9 jugadas de apertura, las posiciones del casillero grande. Una posible jugada para X es tomar el ángulo superior izquierdo. Se busca la subplantilla 3 × 3 del ángulo superior izquierdo de la plantilla grande y se traza una X en la casilla del ángulo superior izquierdo de la subplantilla. La subplantilla constituye ahora un dibujo de la partida tras esta jugada de apertura. Otra posibilidad sería que X empezase en el cuadrado central de la fila inferior; para representar esta jugada, se busca la subplantilla correspondiente al cuadro central inferior de la plantilla grande y se traza una X en el cuadro inferior central de la subplantilla. Cada una de las nueve subplantillas recibe así una X en una subcasilla distinta.

Fijémonos ahora en la subplantilla del ángulo superior izquierdo de la plantilla grande. La primera jugada de X está dibujada ya en el ángulo superior izquierdo; los otros ocho subcuadros representan posibles jugadas de O. Ahora bien, si llenásemos de Oes todos estos subcuadrados, no tendríamos dónde situar la segunda jugada de X. Se opta, pues, por repetir el truco de la jugada de apertura: dividir cada uno de los ocho cuadritos en blanco en sub-subplantillas de 3 × 3 sub-subcuadros, lo que produce ocho tablerillos de tatetí. Inscribimos una X en el vértice superior izquierdo de cada uno, para representar la jugada de apertura de X; después, una de las ocho posibles jugadas de O en cada uno de los tableritos de tres en raya.

Podemos continuar de igual modo, registrando todas las posibles jugadas en subtableros de tamaño cada vez menor. Todas las casillas desocupadas de cada nivel se subdividen en plantillas de 3 × 3, y todas las jugadas anteriores a ese nivel se copian en las casillas de esas plantillas. La figura final posee una estructura cuasi-fractal porque las reglas del juego son recursivas: las jugadas posibles en cada nivel están determinadas por las jugadas anteriormente realizadas. También la geometría de las fractales es recursiva: figuras sibisemejantes se repiten a escalas cada vez menores. La figura del tres en raya es más una cuasi-fractal que una fractal auténtica, porque la partida concluye en un número finito de jugadas.

Pasamos ahora a la lógica. El área más sencilla de la lógica matemática, el llamado cálculo proposicional, se ocupa de enunciados cuyo “valor de verdad” es, ora 1, indicativo de que el enunciado es verdadero, ora 0, o sea, falso. Por ejemplo, el enunciado

Acuse de recibo

Sobre el problema del ganado del Sol [junio], Chris Rorres, de la Universidad de Drexel, me dice que hay más información en un borrador distribuido por A. Nygrèn, de la Universidad finesa de Oulu, que lleva por título “A Simple Solution to Archimedes’ Cattle Problem”. En ese escrito se expone un algoritmo que sólo requiere cinco segundos en un ordenador Pentium II que utilice los programas Maple o Mathematica para resolver el problema. En la página de Rorres en la Telaraña (www.mcsdrexel.edu/~crorres/Archimedes/Cattle/Solution2.html) figuran enlaces a ficheros electrónicos del borrador.

P = “los cerdos vuelan” tiene un valor de verdad de 0, mientras que Q = “Africa es un continente” tiene valor de verdad igual a 1. Los enunciados se pueden combinar mediante diversos operadores lógicos, como la conjunción Y, o la disyunción O. Si P y Q son los enunciados anteriores, P Y Q es “los cerdos vuelan y Africa es un continente.” Este enunciado es falso, por lo que el valor de verdad de P Y Q es 0. Los resultados de aplicar el operador Y a dos enunciados quedan resumidos en la siguiente tabla de verdad:

P	Q	P y Q
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

También es posible trocar el 0 en 1 y el 1 en 0 mediante el operador NO; vale decir, NO P es verdadero si P es falso, y recíprocamente.

Para dos enunciados existen 16 posibles tablas de verdad, que representan todas las formas posibles de colocar ceros y unos en la última columna de la tabla. Podemos denotarlas con números de cuatro dígitos binarios consecutivos: 0000, 0001, 0010, 0011 y así, hasta 1111. (Estos números, en notación decimal, son 0, 1, 2, ..., 15.) Tal lista origina otra cuasi-fractal. Para dibujarla, tracemos una plantilla cuadrada de 16 por 16 cuadritos, y añadamos sobre la hilera superior una orla que identifique cada columna con uno de los números binarios (*véase la figura 1*). Añadamos después otra orla idéntica que baje por el margen izquierdo de la tabla para enumerar las filas. Elijamos 16 colores distintos, que serán representantes de los 16 números binarios, y pintemos correspondientemente las casillas del margen. Se elige después un operador lógico, por ejemplo, la “barra” u operador de Sheffer, que se representa en lógica por el símbolo |. En informática, la barra de Sheffer se conoce como operador NO-Y o NAND, porque P | Q = NO (P o Q). Su tabla de verdad correspondiente es:

P	Q	P | Q
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Ahora, para cada uno de los cuadritos de la plantilla de 16 × 16, pongamos el índice de fila, formado por cuatro dígitos binarios, en la primera columna de la tabla de verdad de P | Q y el índice de columna del cuadro en la segunda columna. Efectuemos sobre ellos la operación NO-Y, anotando en la última columna de la tabla los valores de verdad resultantes. Se obtiene así otro número binario de cuatro dígitos. Se busca el color asociado a este número y se utiliza para marcar el cuadro de la plantilla de 16 por 16. Veamos un ejemplo. Sea el cuadro situado en la fila 5 y la columna 11. Dichos índices, en notación binaria, son, respectivamente, 0101 y 1011. Al insertarlos en la tabla de verdad de P | Q se obtiene:

P	Q	P | Q
0	1	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

El número de la última columna es 1110, equivalente a 14 en notación decimal. Por ello, al cuadro de la fila 5, columna 11, se le asigna el color correspondiente al 14.

El resultado final de este laborioso proceso está ilustrado en la figura 1. Observemos que los cuadrados verdes, correspondientes al número binario 1111, forman una figura muy parecida a la curva de Sierpinski. En lugar de codificar la figura mediante colores, también cabe representar gráficamente el valor de cada cuadro en una tercera dimensión, por ejemplo, como una altura igual al cociente de su valor decimal dividido por 16. Así, la altura del cuadro de la fila 5, columna 11, sería 14/16 = 0,875. Estos gráficos se llaman sólidos de valores. En el caso del sólido de valores de la barra de Sheffer resulta claramente visible una figura similar a la curva de Sierpinski. La explicación es muy sencilla: todo sistema lógico que se valga de recursión, ya sea un juego o una tabla de verdad, puede servir de receta para el dibujo de cuasi-fractales.

(“En España, se suele jugar al tres en raya con fichas y tablero. Si ningún jugador comete errores, el juego se prolonga tanto como se quiera. La representación gráfica explicada engendraría en tal caso una fractal auténtica.” *—Luis Bou*)

La naturaleza y sus fenómenos

antes de Galileo

THE ORDER OF NATURE IN ARISTOTLE'S PHYSICS. PLACE AND THE ELEMENTS, por Helen S. Lang. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **"ÜBER PRINZIPIEN". EINE UNTERSUCHUNG ZUR METHODISCHEN UND INHALTLICHEN GESCHLOSSENHEIT DES ERSTEN BUCHES DER *PHYSIK* DES ARISTOTELES,** por Titus Maria Horstschäfer. Walter de Gruyter; Berlín, 1998. **ARISTOTLE PHYSICS. BOOK VIII.** Traducción y comentarios de Daniel Graham. Oxford University Press; Oxford, 1999.

ARISTOTLE'S *METEOROLOGY* AND ITS RECEPTION IN THE ARAB WORLD. Con la edición y traducción del *Treatise on Meteorological Phenomena* de Ibn Suwar y del *Commentary on the Meteorology* de Ibn Bajja, por Paul Lettinck. Brill; Leiden, 1999. **SCIENTIFIC WEATHER FORECASTING IN THE MIDDLE AGES. THE WRITINGS OF AL-KINDI.** Edición crítica y traducción de Gerrit Bos y Charles Burnett. Kegan Paul International; Londres, 2000. **ABU MASAR ON HISTORICAL ASTROLOGY. *THE BOOK OF RELIGIONS AND DYNASTIES* (*ON THE GREAT CONJUNCTION*).** Edición y traducción de Keiji Yamamoto y Charles Burnett. Brill; Leiden, 1999.

***SENTENTIA ET COMPILATIO SUPER LIBROS PHYSICORUM ARISTOTELIS*,** de Francesco della Marca. Edición crítica de Nazareno Mariani. Editiones Collegii S. Bonaventurae ad Claras Aquas; Grottaferrata, 1998. ***EXPOSITIO ET QUAESTIONES IN ARISTOTELIS PHYSICAM AD ALBERTUM DE SAXONIA ATTRIBUTAE*.** Edición crítica de Benoît Patar. Editions de l'Institut Supérieur de Philosophie (Louvain-la-Neuve) - Editions Peeter (Louvain); 1999.

En este mismo número de la revista el lector ha encontrado la explicación más plausible del origen de la naturaleza, de las estrellas y planetas, así como de algunos de sus fenómenos. Durante dos milenios largos las cosas se vieron de otra manera, racional y científica también, o así lo creyeron helenistas, bizantinos, árabes y europeos.

La *Física* de Aristóteles, según ha llegado a nosotros, se expone a lo largo de ocho libros. Exentos de toda concesión literaria, parecen apuntes redactados durante la preparación de las clases o guiones de seminario. Acota en el primero o introducción general las bases del objeto de la disciplina, los principios. A ellos dedicó Titus Maria Horstschäfer su tesis doctoral, refundida en *Über Prinzipien". Eine Untersuchung zur methodischen und inhaltlichen Geschlossenheit des ersten Buches der* Physik *des Aristoteles*. Distínguese en el resto de la obra dos grandes bloques, más homogéneo el primero (libros II-IV sobre la definición de naturaleza, infinito, lugar, vacío y tiempo) que el segundo (V-VIII, sobre el movimiento).

Al abordar el estudio de la naturaleza, propone, hemos de proceder de lo particular y compuesto a lo universal y simple, no sin antes conocer las teorías de cuantos nos precedieron. Reduce a dos las opiniones principales de los presocráticos. Unos defendían la unicidad del principio, fuera móvil (jonios) o fuera inmóvil

Mecánica cuántica, resuelta

THE QUANTUM MECHANICS SOLVER: HOW TO APPLY QUANTUM THEORY TO MODERN PHYSIC, por Jean Dalibard y Jean-Louis Basdevant. Springer Verlag; Heidelberg, 2000.

Es éste un libro sobre *problemas* de mecánica cuántica, y como tal viene a engrosar una lista por ahora bastante corta sobre el tema.

Dos características constituyen su hecho diferencial: en primer lugar, su carácter (típicamente francés, en este caso de L'Ecole Polytechnique) de problemas largos y no triviales, donde las siempre necesarias simplificaciones del proceso experimental se han reducido al mínimo. De hecho, uno de los autores, Dalibard, es uno de los cofirmantes (con Aspect y Roger) del trabajo donde se confirma que experimentalmente se violan las llamadas *desigualdades de Bell*, lo cual elimina toda una serie de teorías de *variables ocultas*.

La segunda de las características anunciadas es la presencia tanto de soluciones detalladas de todos los problemas, como de referencias adecuadas donde poder profundizar en cada uno de los temas. Todo esto tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Los problemas resultan a veces farragosos, y no siempre está clara la necesidad de tanta complicación para practicar conceptos sencillos.

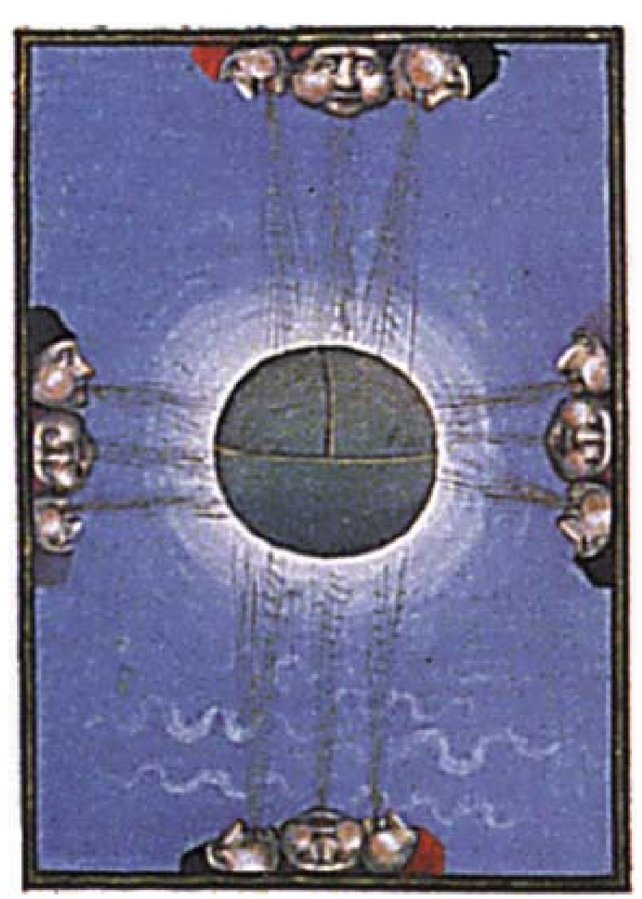
Sin embargo, está claro que, en un curso ideal, se deberían resolver al menos algunos de los problemas de este libro, como aproximación al fascinante y diverso mundo de las aplicaciones de la mecánica cuántica. Pero ello sin olvidar problemas más sencillos, donde los hechos experimentales están muy simplificados (a veces hasta la caricatura), pero que resultan útiles para practicar los conceptos novedosos de la asignatura, conceptos que la experiencia enseña que sólo se adquieren después de haberlos utilizado repetidamente en la práctica.

En resumen, se trata de un buen libro, escrito de forma competente, con una presentación y tipografía adecuadas, muy útil para enseñar la asignatura (y también como ayuda en el estudio personal en el caso, desgraciadamente frecuente, de que el estudiante no sea capaz de plantearse los problemas por sí mismo, lo que naturalmente es siempre preferible).

ENRIQUE ALVAREZ

(eléatas); para los partidarios de la multiplicidad los principios últimos podían ser infinitos (Anaxágoras) o muchos finitos (Empédocles). Descarta una a una todas esas opiniones sacando a la luz sus contradicciones o el absurdo al que llegan y justifica su hilemorfismo, el sustrato de materia y forma que persiste a través del cambio.

Con el libro octavo (*Aristotle Physics. Book VIII*) daba culminación a la ciencia de los cuerpos móviles, que eso es la naturaleza para el estagirita, según ha venido detallando en los apartados precedentes. Ahora transita del movimiento del cosmos a la identificación de una última fuente de todo movimiento y, por ende, de la existencia de la propia naturaleza, el Primer Motor. Antes, Anaxágoras había introducido una mente cósmica, ordenadora de la agitación del caos primigenio y Platón había otorgado al demiurgo el poder de conformar el mundo a imagen del arquetipo ideal.



Los cuatro vientos cardinales, de Le livre des propriétés des choses, *de Jean Corbechon*

Aristóteles rechaza la idea platónica de un movimiento cósmico causado por un alma semovimiente, así como la necesidad de un demiurgo organizador. El cosmos de Aristóteles es eterno, sin comienzo ni fin. En ese cosmos, geocéntrico y esférico, cuyas bases había asentado en *Sobre el cielo*, distingue una región supralunar donde no hay cambio ni alteración, salvo movimiento local; en él todo está compuesto de un quinto elemento etéreo que circula en torno a la tierra. Aquende la Luna, los cuatro elementos —tierra, agua, aire y fuego—, que van ocupando regiones concéntricas y se mueven impelidos por su tendencia natural, tierra y agua hacia abajo, aire y fuego hacia arriba. Aunque admite la transformación de unos elementos en otros, resalta que su cuantía total permanece aproximadamente la misma. De acuerdo con la mecánica aristotélica, todo movimiento requiere una causa. El movimiento violento, opuesto a la tendencia innata o natural, demanda un agente externo que impulse el cuerpo en cada momento. (Se está todavía muy lejos de la primera ley de Newton.) Mas para explicar el movimiento precisa definir el lugar y el vacío que lo posibilitan.

Es el núcleo de la investigación de Lang (*The Order of Nature in Aristotle's Physics. Place and the Elements*), quien somete a un análisis riguroso la idea que identifica la naturaleza con el origen del orden, un axioma que impregna toda la física y que, en cuanto tal, no puede demostrarse por vía deductiva. Sólo cabe aportar pruebas *ex post facto* de esa afirmación.

Para Aristóteles el vacío no ocupa un sitio determinado, ni constituye una entidad separada de los objetos. Sólo el lugar y la inclinación innata de los elementos reflejan el orden de la naturaleza. Y puesto que el "lugar" define los límites de los cuerpos, el universo, infiere Aristóteles, es intrínsecamente direccional; los objetos están arriba, abajo, a izquierda, derecha, delante y detrás, no ya en relación a nosotros, sino también por sí mismas, por su propia tendencia natural. Lugar e inclinación operan juntos. Como resultado de esa sociedad, el movimiento natural de las cosas, absolutamente regular, nos revela el orden de la naturaleza.

Más aún. Los elementos y su relación con el lugar no se limitan a producir un movimiento regular, sino que dan cuenta también del cosmos y de las "cosas que son por naturaleza", vale decir, "los animales con sus partes y las plantas y los cuerpos simples, como la tierra, el fuego, el aire y el agua". Las cosas que son por naturaleza constituyen el objeto primario de la física. Fuera de la naturaleza están las cosas inmóviles: Dios y la matemática.

A los principios generales de la *Física*, Aristóteles añade en los *Meteorológicos* un postulado ulterior: la exhalación constante de la tierra de un doble fluido, uno húmedo (vapor) y otro seco (humo). Esos fluidos provocados por la acción solar dan lugar a los fenómenos meteorológicos, que acontecen entre la Tierra y la esfera lunar. De la exhalación seca nacen, en la atmósfera superior, llamas comburentes, estrellas fugaces, antorchas, "cabras" (meteoritos en forma de copos de lana), cometas, la Vía Láctea y ciertos efectos cromáticos del firmamento. Cuando la humedad se adueña de la atmósfera inferior, se crean diferentes tipos de precipitación. Para Aristóteles, el viento no es el aire que se mueve, sino una exhalación seca que se disuelve desde una tierra calentada por el sol. En el interior de la tierra, si la exhalación seca altera la materia, se forman rocas y minerales; metales, si la exhalación húmeda se comprime y solidifica por la sequedad.

Partiendo de esa doctrina, los árabes ahondan en lo que llamaban "ciencia de los fenómenos superiores". Comienzan por la traducción de los *Meteorológicos* de Aristóteles realizada en Bagdad, hacia mediados del siglo nono, por Yahya b. al-Bitriq. Siguen innumerables paráfrasis y comentarios a los *Meteorológicos*, junto con tratados escritos por Ali ibn Rabban at-Tabari (+860), al-Kindi (+873), an-Nasi (+906), al-Masudi (+965), al-Maqdisi (*fl.*960), ibn al-Amid (+976), Ikwan as-Safa (finales del siglo X), ibn Sina (+1037), ibn Bajja (+1138), ibn Rusd (+1198), al-Tifasi (+1253) o al-Qazwini (+1283).

Aristotle's Meteorology and its Reception in the Arab World atiende a los tratados de corte teórico, desde las cartas redactadas por al-Kindi hasta el *Comentario breve y medio* sobre los *Meteorológicos* aristotélicos de Ibn Rusd, pasando por fragmentos de Avicena (precipitaciones y vientos), sin olvidar las secciones meteorológicas de las principales obras enciclopédicas, paráfrasis y compendios. Se someten a examen el *Tratado sobre fenómenos meteorológicos* de Ibn Suwar ibn al-Kammar (+1030) y, de Ibn Bajja, el *Comentario a los Meteorológicos*, que se editan por vez primera. En esa tradición resulta determinante la traducción realizada al árabe por Ibn al-Bitriq, una versión deficiente e incompleta, fuente de la traducción latina de Gerardo de Cremona en el siglo XII (*vetus translatio*). William van Moerbeke, en la centuria siguiente, abordó una nueva traducción más completa (*nova translatio*).

El *Tratado sobre fenómenos meteorológicos* —ceñido a los causados por el vapor húmedo (halo, falsos soles y arco iris)— de Ibn Suwar al-Kammar constaba de tres partes: un examen general de tales fenómenos, una traducción (del siríaco) del texto aristotélico sobre la cuestión y un comentario al mismo. Sólo nos ha llegado la primera parte de esta obra. Ibn Bajja (Avempace), primer comentarista de Aristóteles en España, ejerció una influencia decisiva en Ibn Rusd (Averroes). Antepuso a la autoridad del estagirita el peso de la observación. Su *Comentario sobre los Meteorológicos* se desarrollan en una suerte de paráfrasis libres. Atribuye el "fenómeno" de la Vía Láctea a la combinación de una causa celeste y otra terrestre: la luz de la Vía procede de las estrellas del cielo, pero el que aparezca en forma de camino débese a la refracción de esa luz en la atmósfera superior. Explicación que repitió Ibn Rusd.

¿Puede predecirse la cadencia de esos fenómenos? Si siempre importó

El camino de la bioquímica

Los elementos y moléculas de la vida. Introducción a la Química Biológica y Biología Molecular, por Manuel Losada Villasante, M.ª Angeles Vargas, Miguel A. de la Rosa, Francisco J. Florencio. Editorial Rueda, S.L., Madrid, 1998.

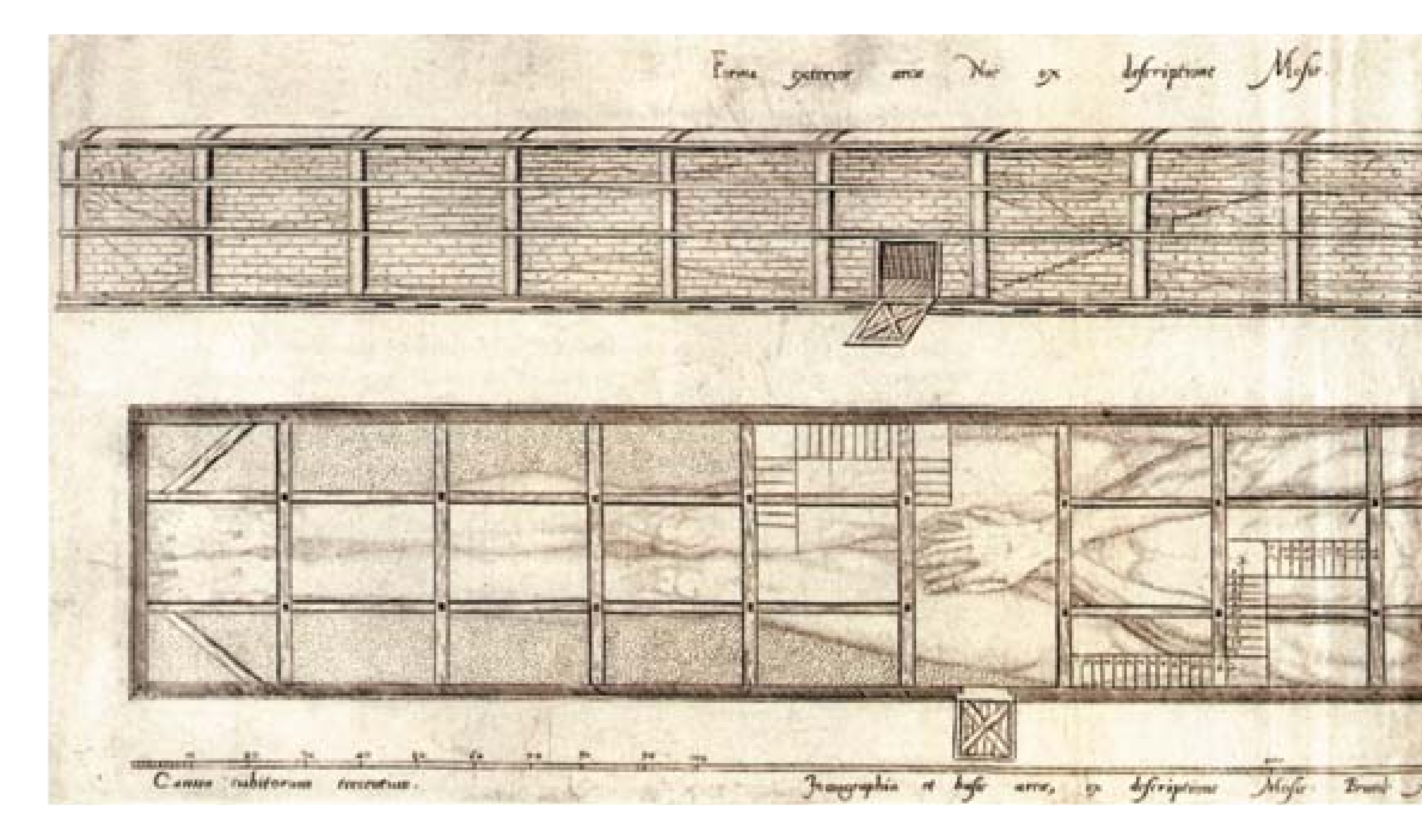
Además de su contenido en aspectos fundamentales de los principios físico-químicos que rigen los fenómenos que tienen lugar en los seres vivos, este libro aporta una revisión histórica de los científicos que los establecieron, resultando de indudable interés para los enseñantes de la bioquímica, la biología molecular y disciplinas relacionadas. Sin embargo, aunque en su prólogo se subraya el esfuerzo de los autores en presentar los distintos temas con sencillez y claridad, esto lo consiguen solamente en algunos capítulos. Se necesitan considerables conocimientos básicos para llegar a entender una parte sustancial de su contenido. De acuerdo con el consejo del gran maestro Ortega y Gasset de que "siempre que enseñes, enseña cómo se llegó a esa verdad", sí que resulta verdaderamente original e interesante la presentación que se hace en esta obra, no sólo de los conocimientos, sino también cómo se llegó a ellos, rindiendo un merecido tributo a aquellos sabios y maestros que aportaron muchos de los principios de las ciencias de la vida. Este rigor histórico, sin embargo, se muestra desequilibrado, e incluso chocante, al mencionar de una forma claramente parcial a determinados científicos españoles tales como Albareda, Sánchez-Monge, Giménez, Morreale de Escobar, Grisolía, Ochoa, Sols y el propio autor del libro (M. Losada). Sin minusvalorar a los citados, los autores se olvidan de citar a otros muchos españoles que han contribuido también con investigaciones relevantes al conocimiento de la bioquímica y la biología molecular; al menos debería haberse reconocido o justificado en el Prólogo de la obra este desequilibrio.

Cabe también reseñar que ese esfuerzo en presentar el "cómo se llegó a esa verdad" hace que algunos científicos se citen de forma excesivamente repetitiva en diversos capítulos (Lavoisier, Boyle, Pasteur, etc.), y que sobre todo en la primera parte de la obra haya páginas en las que se lleguen a citar hasta 15 o 20 nombres, repitiéndose en algunos casos hasta 4 o 5 veces un mismo nombre en la página. Aunque esta reiteración pueda ser rigurosa desde el punto de vista histórico, hace que la lectura de determinados capítulos sea tediosa y con pérdida importante de la información que se pretende transmitir. En este aspecto cabe también indicar que, precisamente porque se reduce sustancialmente el número de citas a favor de una mayor claridad, sencillez y orden, la lectura de la segunda parte de la obra resulta considerablemente más fácil y amena que la primera.

En cuanto a su contenido, la primera parte se dedica a desarrollar los aspectos básicos de los elementos y moléculas que configuran la estructura de la materia viva, así como de los principios fisicoquímicos que rigen algunas de sus interacciones y funciones: principios de termodinámica y termoquímica, bioenergética, etc. La segunda parte es más descriptiva, analizando las propiedades físicas y químicas, obtención y aplicaciones de los elementos biogenésicos, los principios de la fijación del nitrógeno y el estudio de los elementos salinos y elementos traza, para terminar con el estudio del origen y evolución del universo y de la vida en la Tierra, así como de los ciclos de los bioelementos en la biosfera. La obra concluye con cinco apéndices que son de indudable utilidad e interés: sistema internacional de unidades, campo gravitatorio, campo eléctrico, campo magnético, nomenclatura y estequiometría.

Así pues, personalmente, y como docente de la bioquímica, después de revisar detalladamente esta obra, debo reconocer que me será de gran utilidad para preparar mis clases y conferencias, y la aconsejaré como libro de consulta a aquellos alumnos que quieran profundizar en el conocimiento de los principios fisicoquímicos que rigen las funciones de la materia viva. Sin embargo, no puedo aconsejarla como un manual de introducción a la química biológica y biología molecular a estudiantes o lectores interesados, pues resulta excesivamente densa; sobre todo, su primera parte, y más aún si no cuentan con un adecuado nivel de preparación para su digestión y asimilación.

Emilio Herrera



saber cuándo podía llover reparadoramente o granizar sin misericordia, padecer severos estiajes o evitar inundaciones, en el mundo árabe ese afán se trocó en empeño científico (*Scientific Weather Forecasting in the Middle Ages. The Writings of al-Kindi*). La peculiar situación cultural de Bagdad a mediados del siglo nono estimuló la producción de los primeros tratados sobre previsión del tiempo. Se trata de dos epístolas del "Filósofo de los árabes", al-Kindi, quien combina la tradición agrícola árabe, la meteorología griega y la astrología científica. No se ha descubierto el texto original árabe de las cartas, pero conocemos la obra a través de dos traducciones hebreas y una versión latina independiente. Esos textos, editados ahora por Gerrit Bos y Charles Burnett, inician un género literario que ocupó un lugar destacado en la ciencia y en la sociedad medievales.

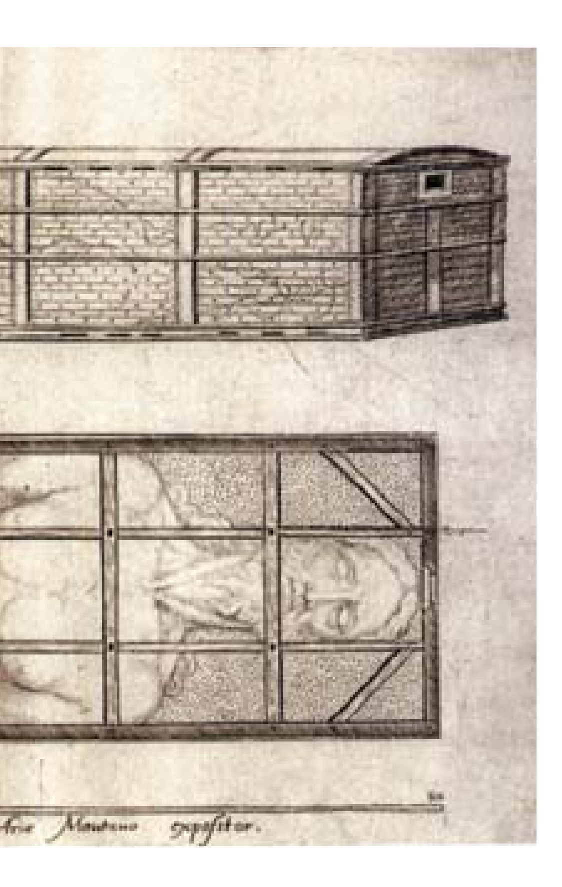
No sólo los campesinos necesitaban saber si llovería (sobre todo en zonas naturalmente cálidas y secas), sino también los mercaderes precisaban conocer de antemano las posibilidades de un temporal en el mar y los estrategas si se darían circunstancias favorables para una batalla. Dada la íntima conexión entre clima y salud, al médico le importaba prever las enfermedades probables y qué dietas prescribir de acuerdo con los cambios de tiempo.

Arabes y autores latinos medievales incluían esos conocimientos en la ciencia "sobre los fenómenos de la atmósfera" (*de accidentibus aeris*). En ella, la situación y movimientos de los cuerpos celestes constituía el primer indicador del tiempo. La lista más antigua y comprehensiva de las predicciones populares la encontramos en *Peri semeion* o *De signis*, del año 300 a.C., que reúne textos sobre los signos del tiempo de Aristóteles y Teofrasto. Nos ha llegado en griego y en la traducción latina realizada a mediados del siglo XIII por Bartolomé de Messina. Recoge "signos de la lluvia", "signos del viento", "signos de tormenta" y "signos de buen tiempo". Información que será aprovechada por Plinio y Ptolomeo. Pero esas clases de signos, que dependían enteramente de una observación empírica, carecían del menor soporte matemático o astronómico.

Un tipo más ordenado de predicción era el basado en el calendario (*parapegma*), donde se asociaban los cambios de tiempo a los ortos y ocasos de diferentes estrellas y constelaciones a lo largo del año. Así, la estación para navegar está marcada por el orto y el ocaso de las Pléyades y el punto de máximo calor está vinculado a la salida del Can (Sirius). Una corriente paralela a los *parapegma* clásicos puede observarse en el mundo árabe. Ya en tiempos preislámicos los árabes habían observado 28 estrellas fijas, que cursaban a pares: cuando una se escondía al amanecer, emergía la otra. La estrella que se ocultaba marcaba el comienzo de una naw, que duraba hasta el ocultamiento de la siguiente estrella prominente, 13 días más tarde. Cada intervalo de esos presentaba sus propios rasgos climáticos. En su conjunto partían el año solar de 365 días en 28 divisiones. Estas 28 divisiones aportaban una alternativa a las 12 divisiones de los signos del zodíaco.

Ambos métodos populares conviven con la tradición científica de predicción del tiempo ligada a los *Meteorológicos* de Aristóteles. Al-Kindi, su sistematizador, combinó la doctrina griega con otras enseñanzas persas e hindúes. En respuesta a los ruegos de un estudiante, justifica, explica los principios de la meteorología, los fenómenos de la atmósfera y el tiempo, y las causas de la humedad, sequedad, calor y frío. A su entender, los libros de la *Física* deben servir de introducción para una materia que es, asimismo, matemática y astronómica.

Los cuerpos celestes, razona, provocan calor con su movimiento. La cantidad de calor depende de la ra-



Representación del Arca de Noé en Antiquitatum Iudaicarum *de Benito Arias Montano*

pidez y cercanía de ese movimiento y de nuestra latitud. El movimiento del Sol es el más influyente; su distancia de nuestro zenit y su posición en su círculo excéntrico causan la variación de temperatura entre las cuatro estaciones. Describe un esquema minucioso de la cantidad de calor generado por los planetas y el Sol juntos. Tras establecer qué clima en cualquier momento es cálido y cuál frío, se puede descubrir la dirección del viento: el calor insta la expansión del aire; el frío, su contracción. La predicción debe realizarse cuatro veces al mes: a comienzos de la luna nueva, cuarto creciente, luna llena y cuarto menguante.

Según parece, al-Kindi atrajo a Abu Masar al terreno de la astrología (*Abu Masar On Historical Astrology. The Book of Religions and Dynasties*). Algunos, fundados en la semejanza entre las cartas del primero y una sección de *Sobre la Gran Conjunción* de Abu Masar, incluso acusaron a éste de plagio, afirmación desmentida por Burnett.

En los textos astrológicos, las predicciones se resuelven en forma de prótasis y apódosis. Cuando las prótasis se basan en fenómenos astronómicos y meteorológicos, las apódosis remiten a asuntos generales —inundaciones, hambrunas y seísmos— que pertenecen a la astrología natural. Cuando los fenómenos celestes interpretados por la astronomía matemática se introducían en prótasis y se predecían asuntos personales, nos hallamos ante la astrología horoscópica o personal. Larga es la secuencia de autores árabes que dejaron su sello en astrología: Zaradust, Gamasb, Masaallah, Kankah al-Hindi, Umar ibn al-Farruhan, Sahl ibn Bisr, al-Kindi, an-Nayrizi, al-Battani, Ibn Kibriya an-Nawbahti, as-Sigzi, Ibn Magur, Ibn Abi r-Rigal y Muhyi d-Din al-Magribi. Por encima de todos destacó Abu Masar Gafar ibn Muhammad ibn Umar al-Balhi (787-886 d.C.).

Abu Masar (Albumasar), el astrólogo más afamado de la Edad Media, desarrolló su actividad en Bagdad y escribió sobre todas las ramas de la ciencia de las estrellas, incluidas tablas astronómicas, astrología personal (levantamiento de horóscopos sobre aniversarios del nacimiento), elecciones (decisiones) y otros. Su obra más reputada fue la *Gran introducción a la astrología*, donde instala la disciplina en el marco de la cosmología aristotélica. No menor interés reviste su *Libro de religiones y dinastías*.

La doctrina del retorno de todos los cuerpos celestes al lugar donde se originaron (el año mundial) y la implicación de que cada retorno comporta una secuencia mimética de acontecimientos terrestres se remonta al pensamiento griego. La misma idea de vastos períodos de tiempo determinados por los retornos de los cuerpos celestes surgieron en la astrología india, que situaba el punto de arranque en el momento en que todos los planetas medios, sus apogeos y sus nodos estaban en Aries 0º en el equinoccio vernal del año 1.972.947.102 a.C. Con el tiempo, fueron entrando en juego muchos sistemas rivales, que han sido estudiados por Edward Kennedy y David Pingree. Se supone que la proliferación de períodos temporales y de su aplicación a la astrología práctica se debió a los astrólogos persas del período sasánida. Entre los astrólogos de extracción persa de los dominios islámicos se cuentan dos que intervinieron en la determinación del horóscopo para la fundación de Bagdad en el 762, Masaallah y Umar ibn al-Farruhan. Heredero de las tradiciones hindú, sasánida y árabe, Abu Masar compila ese saber astrológico en su *Libro de religiones y dinastías*, aunque no cite ninguna fuente o autoridad fuera de “los antiguos”, los “maestros de los talismanes” y una autoridad inidentificable sobre cronología. Se apoya sobre todo en la astrología general y la astrología horoscópica o personal.

Con respecto a las condiciones generales, sustituye los eclipses del Sol y la Luna por conjunciones de los planetas mayores, que aportan las respuestas a cuatro cuestiones: ¿dónde sucederá un acontecimiento? ¿cuándo ocurrirá? ¿cuál será su naturaleza general? y ¿cuál su naturaleza específica o cualidad? La astrología personal, que determina la historia biológica del individuo desde su nacimiento (el horóscopo levantado sobre el momento exacto del alumbramiento), alcanza su máximo interés cuando se trata de profetas y califas. Su versión latina fue el libro clave de la astrología histórica en la Edad Media, cuya evolución deshilvana Burnett en la atmósfera española renacentista del valle del Ebro y Toledo.

La interpretación bajomedieval de la *Física* de Aristóteles empieza a adquirir un nuevo enfoque, más creador, a principios del siglo XIV (*Sen-*



Arco iris, de Le livre des propriétés des choses*, de Jean Corbechon*

Género y ciencia

PIONERAS ESPAÑOLAS EN LAS CIENCIAS. LAS MUJERES DEL INSTITUTO NACIONAL DE FÍSICA Y QUÍMICA, por Carmen Magallón Portolés. Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, 1998.

Esta obra analiza la aportación de las mujeres a las ciencias físico-químicas en España durante la primera mitad del siglo XIX, en particular a través de su trabajo en las secciones del Instituto Nacional de Física y Química. Esta perspectiva se completa con el estudio de su presencia en las sociedades científicas españolas y de su actividad en el primer laboratorio creado para preparar a las estudiantes en estos campos, el laboratorio Foster de la Residencia de Señoritas.

Desde una perspectiva de género amplia y objetiva, la autora busca respuesta a la cuestión siguiente: ¿Puede aceptarse como cerrada y completa una noción de ciencia que ha sido elaborada desde una estructura de pensamiento sesgada y excluyente? Los materiales que aporta esta obra intentan corregir este sesgo rastreando la presencia de la mujer en la ciencia desde su ingreso efectivo en la universidad en 1910. La apertura, diez años después, de la Residencia de Señoritas para alojar a las universitarias de toda España que se trasladaban a estudiar a Madrid, especialmente farmacia, pero también química, medicina, ciencias y magisterio, supuso la creación de un centro que mantuvo una gran actividad científica hasta su cierre en 1936. En él se abrió el laboratorio de química que tomó el nombre de su directora, Mary Louise Foster, cuya presencia en España se debía a las relaciones establecidas por la Residencia, a través de la Junta de Ampliación de Estudios, con varios Colleges femeninos de los Estados Unidos, con la finalidad de colaborar en la educación superior de las mujeres españolas. El impulso continuado de la directora de la Residencia, María de Maeztu, única mujer que formó parte de la Junta de Ampliación de Estudios, fue decisivo para el buen funcionamiento del laboratorio Foster.

Tras rastrear la actividad de la mujer en diversas instituciones y sociedades científicas, la autora concluye que su paso por la universidad fue en general brillante y que su presencia en las facultades de ciencias creció a un ritmo mayor que en el resto de las facultades, lo que contradice la idea preconcebida de su interés preferencial por las letras. Asimismo las mujeres consiguieron, en igualdad de condiciones que los hombres, pensiones de la Junta de Ampliación de Estudios para viajes de estudios en el extranjero, así como becas específicas debidas a la actitud solidaria de las universitarias estadounidenses. Los expedientes de las mujeres que trabajaron en el Instituto Nacional de Física y Química muestran su pertenencia a la clase media ilustrada ligada a núcleos republicanos e influenciada por las ideas de la Institución Libre de Enseñanza. En general, fueron alumnas aventajadas e investigadoras fructíferas.

El estudio se completa con siete apéndices de una gran utilidad que contienen la relación completa de becadas por la Junta de Ampliación de Estudios, de los miembros femeninos de las diferentes sociedades científicas españolas, así como sus datos biográficos y publicaciones. Se cierra la obra con la enumeración de los archivos y de la bibliografía consultados.

Esta monografía, en fin, cumple con creces el objetivo fijado por la autora, perfilar el grupo humano denominado "españolas en las ciencias" a través de datos pormenorizados, a veces incluso excesivamente farragosos, de su trayectoria biográfica y profesional, así como del contexto social e institucional en el que desarrollaron su actividad.

MARÍA JOSÉ BÁGUENA

tentia et compilatio super libros Physicorum Aristotelis y *Expositio et Quaestiones in Aristotelis Physicam ad Albertum de Saxonia Attributae*). Francesco della Marca, franciscano docente en la Universidad de París entre 1319 y 1324, aunque apegado todavía a una lectura ortodoxa, contestaba a la pregunta “de qué modo los proyectiles se mueven sin solución de continuidad, incluso después de haberse despegado del agente motor” negando toda continuidad, si bien concedía que el motor eran las partículas de aire. Se aleja, también en parte, de la tesis aristotélica de un movimiento coeterno con el mundo; en su opinión la demostración de Aristóteles no es tal, sino un *sermo probabilis*, falto de pruebas taxativas.

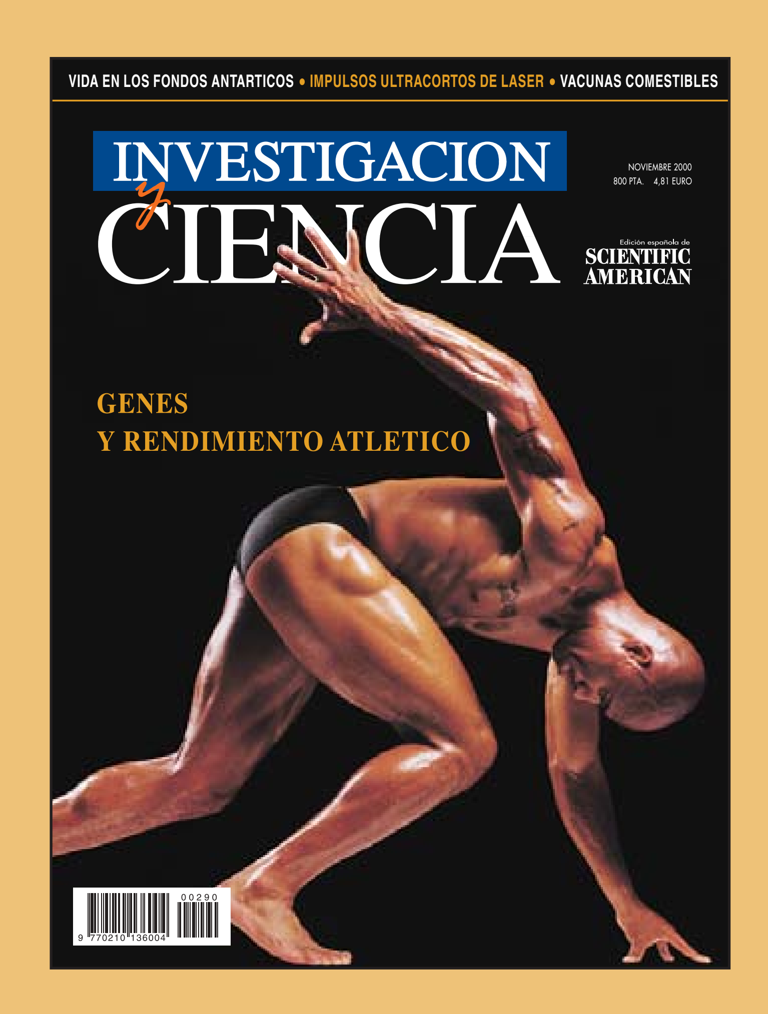
Cierto es, dice, que existe una inclinación natural de cada elemento. Pero el movimiento de la piedra está indeterminado con respecto a cualquier posición; de hecho, puede lanzarse hacia arriba, hacia abajo, a la derecha, a la izquierda, con movimiento rectilíneo o circular; por tanto, la tendencia natural no puede fijar el movimiento. Para Della Marca, el movimiento del grave hacia arriba lo determina una primera fuerza inicial, la de la mano, y una segunda fuerza que prosigue el movimiento comenzado y lo conduce a término; esta fuerza está causada y dejada en el grave por la primera.

M. Benoît Patar presenta la edición crítica de un comentario medieval de la *Física* de Aristóteles que los especialistas han venido atribuyendo a Alberto de Sajonia; él otorga la autoría a Jean Buridan. El lector se queda sin conocer las bases de su tesis discrepante porque los responsables de la colección y los asesores externos de la misma decidieron no publicarlas. Nos hallamos, pues, ante un trabajo enteco de metodología crítica.

Alberto de Sajonia (1316-1390) se inscribe en el movimiento reformador auspiciado por Oxford y París. Si en lógica depende de Ockham, en física su guía fue Buridan y, en matemática, Bradwardine. Estudió con ahínco el problema de los graves y distinguió entre centro de gravedad y centro geométrico. A propósito de la velocidad de la caída de los graves centró la cuestión en averiguar si la velocidad era proporcional al tiempo o al espacio. Buridan fue también discípulo de Ockham. Se le recuerda, en física, por su teoría del “impetus”, en virtud del cual el agente móvil imparte al objeto movido una fuerza, proporcional a la velocidad y la masa, que lo mantiene en movimiento. Advirtió, además, la fuerza de resistencia que oponía el medio así como la del propio peso. En buena medida, esas ideas se reflejan en la obra.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



GENES Y RENDIMIENTO ATLETICO, por Jesper L. Andersen, Peter Schjerling y Bengt Saltin

La biología celular del músculo descubre las razones en virtud de las cuales un atleta se alza con el triunfo y traza las líneas por donde debieran discurrir los esfuerzos del entrenamiento.

SOMBRAS DE OTRAS TIERRAS, por Laurance R. Doyle, Hans-Jörg Deeg y Timothy M. Brown

Los astrónomos, que han encontrado numerosos planetas gigantes allende nuestro sistema solar se han mostrado incapaces de vislumbrar todavía ninguna Tierra nueva, parecida a la nuestra.

VACUNAS COMESTIBLES, por William H. R. Langridge

Llegará el día en que los niños podrán inmunizarse masticando patatas o plátanos modificados en vez de sufrir el molesto pinchazo. Y lo que es aún más importante, las vacunas comestibles podrán prevenir enfermedades en millones de personas que ahora mueren por falta de acceso a las vacunas tradicionales.

IMPULSOS ULTRACORTOS DE LASER, por John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett

La más breve de las obras humanas, el destello de luz de láser con una duración de millonésimas de nanosegundo, es útil en delicadas operaciones oftalmológicas, comunicaciones de banda muy ancha y el estudio, congelado su movimiento, de las reacciones moleculares.

LA VIDA EN LOS FONDOS ANTARTICOS, por Josep-Maria Gili, Covadonga Orejas, Joandomènec Ros, Pablo López y Wolf W. Arntz

Las comunidades de suspensívoros bentóticos de los mares antárticos muestran una amplia diversidad y parecen superar sin problemas el invierno austral. Los autores explican cómo se las arreglan.

QUIENES FUERON LOS PRIMEROS AMERICANOS, por Sasha Nemecek

No parece que fueran cazadores de mamuts. Todos los indicios apuntan hacia pueblos de pescadores y tejedores.

SALVEMOS LA CASA DE LA CASCADA, por Robert Silman

Esta sorprendente construcción diseñada por Frank Lloyd Wright corría peligro de hundirse hasta que una firma de ingeniería encontró el modo de frenar su caída.

